

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí

**Dřevěná lávka**

**Timber footbridge**

Student:

Bc. Tomáš Hamrus

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Antonín Lokaj, Ph.D.

Ostrava 2015

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta stavební  
Katedra konstrukcí

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Hamrus**  
Studijní program: N3607 Stavební inženýrství  
Studijní obor: 3607T037 Konstrukce staveb  
Téma: **Dřevěná lávka  
Timber Footbridge**  
Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

V rámci diplomové práce vypracujte:

1. Proveďte rešerši historických i současných konstrukčních systémů dřevěných lávek.
2. Navrhněte tři varianty konstrukčního systému dřevěné lávky přes vodoteč o rozpětí min. 30 m.
3. Zvolte optimální variantu a zpracujte návrh rozhodujících nosných prvků a spojů (včetně ztužidel) v mezním stavu únosnosti i použitelnosti.
4. Zpracujte ve vhodném měřítku výkresovou dokumentaci pro stavební řízení (půdorys, řezy, pohledy, detaily)
5. Navrhněte možný způsob založení lávky.
6. Navrhněte vhodný způsob montáže lávky.

### Seznam doporučené odborné literatury:

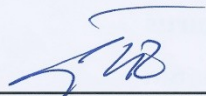
- 1) ČSN EN 1995-1-1: Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí. Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.
- 2) ČSN EN 1995-2: Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí. Část 2: Mosty
- 3) Blass, H. J. a kol.: Dřevěné konstrukce podle EUROKÓDU 5. STEP 1. Navrhování a konstrukční materiály. Vydal Koželouh, B. – KODR Zlín, 1998.
- 4) Blass, H. J. a kol.: Dřevěné konstrukce podle EUROKÓDU 5. STEP 2. Navrhování detailů a nosných systémů. Vydal Informační centrum ČKAIT, 2004.
- 4) Natterer, J. O. et al., Holzbau Atlas, Birkhauser – Verlag für Architektur, 2003, Basel, Schweiz, ISBN 3-7643-6984-1
- 5) Gerold, M., Holzbrücken am Weg, Bruderverlag, Karlsruhe, 2001.
- 6) Mucha, A., Holzbrücken. Bauverlag, Wiesbaden, 1995.
- 7) Příručka 1 a 2, <http://fast10.vsb.cz/temtis/cz>, 2008.
- 8) Dřevostavby a dřevěné konstrukce I. a II. díl, CERM Akademické nakladatelství Brno, 2010.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

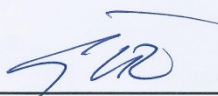
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Antonín Lokaj, Ph.D.**

Datum zadání: 27.02.2015

Datum odevzdání: 30.11.2015



prof. Ing. Radim Čajka, CSc.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Čajka, CSc.  
děkan fakulty

### **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 30.11. 2015

.....  
podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 30.11. 2015

.....

podpis studenta

## **Anotace**

Práce se zabývala konstrukcí dřevěné lávky pro pěší a cyklisty. Nejprve byla zpracována rešerše historických i současných konstrukčních systémů. Z tohoto přehledu vycházel návrh 3 variant konstrukčního systému dřevěné lávky přes vodoteč o rozpětí 30 m. Pro všechny varianty byl proveden předběžný návrh a posudek hlavních nosných prvků v mezním stavu únosnosti i použitelnosti. Porovnáním spotřeby materiálů a tuhostí konstrukcí jednotlivých variant bylo zvoleno optimální řešení. Tímto řešením byla shledána oblouková nosná konstrukce, pro kterou byl zpracován návrh a posudek všech nosných prvků, ztužidel a vybraných spojů v mezním stavu únosnosti i použitelnosti. Dále byly rovněž ověřeny vlastní frekvence kmitání konstrukce. V poslední fázi práce byl navržen možný způsob montáže lávky. Součástí diplomové práce byla také tvorba výkresové dokumentace pro stavební řízení. Posudky prvků a spojovacích prostředků byly provedeny na základě platných norem ČSN EN.

## **Klíčová slova**

Scia Engineer; lávka; lepené lamelové dřevo; rešerše; konstrukční systém; posudek; oblouk; hlavní nosník, příčník, táhlo, modální analýza; svorník.

## **Annotation**

Dissertation dealt with construction of timber footbridge for pedestrian and cyclists. At first the research of historical and present structural systems was compiled. Based on this information 3 possible structural systems of timber footbridge were designed. The footbridge is vaulting over the watercourse of 30 m range. For every 3 variants there were preliminary design and review for main supporting elements of the ultimate and serviceability limit state processed. Thanks to comparison of material consumption and toughness of construction the optimum variant was choosen, the arc construction. For this option there were the design and review of all the elements, bracing and joints of the ultimate and serviceability limit state made. Frequency of vibration was also checked. Then there was the way of montage mentioned. Drawings were also part of the thesis. The review was executed according to current applicable standards ČSN EN.

## **Keywords**

Scia Engineer; footbridge; glued laminated timber; research; structural system; review; arc; main beam; crosspiece; pull; modal analysis; bolt.

## Seznam použitých zkratk a symbolů

### *Písmena velké latinské abecedy*

$A$	plocha průřezu [ $\text{mm}^2$ ]
$A_{ef,90}$	kontaktní plocha v tlaku kolmo k vláknům [ $\text{mm}^2$ ]
$A_{\text{čep}}$	plocha čepu [ $\text{mm}^2$ ]
$A_d$	otlačovaná plocha dřeva [ $\text{mm}^2$ ]
$A_{osl.}$	plocha oslabeného průřezu [ $\text{mm}^2$ ]
$A_w$	účinná plocha svarového obrazce [ $\text{mm}^2$ ]
$E_{0,05}$	hodnota 5% kvantilu modulu pružnosti [MPa]
$E_{0,mean}$	průměrná hodnota modulu pružnosti rovnoběžně s vlákny [MPa]
$E_{90,mean}$	průměrná hodnota modulu pružnosti kolmo k vláknům [MPa]
$F_k$	charakteristická hodnota osamělého břemena [kN]
$F_{v,Rk}$	charakteristická únosnost spojovacího prostředku [kN]
$F_{v,Rd}$	návrhová únosnost spojovacího prostředku [kN]
$G_{mean}$	průměrná hodnota modulu pružnosti ve smyku [MPa]
$I_y$	moment setrvačnosti k ose y [ $\text{mm}^4$ ]
$I_v$	intenzita turbulence [ $\text{mm}^4$ ]
$I_z$	moment setrvačnosti k ose z [ $\text{mm}^4$ ]
$L$	délka prvku [mm]
$LLD$	lepené lamelové dřevo
$L_{cr,y}$	vzpěrná délka pro vybočení v rovině prvku [mm]
$L_{cr,z}$	vzpěrná délka pro vybočení z roviny prvku [mm]
$M_{Ed}$	návrhová hodnota ohybového momentu [kNm]
$M_{y,Ed}$	návrhová hodnota ohybového momentu k ose y [kNm]
$M_{z,Ed}$	návrhová hodnota ohybového momentu k ose z [kNm]
$M_{přísl.}$	příslušná hodnota ohybového momentu v konkrétní části prutu [kNm]
$M_{y,Rk}$	plastický moment únosnosti [Nmm]

$MSP$	mezní stav použitelnosti
$MSÚ$	mezní stav únosnosti
$N_{Ed}$	návrhová hodnota normálové síly [kN]
$N_{přisl.}$	příslušná hodnota normálové síly [kN]
$NC$	nelineární kombinace
$R_x$	vodorovná reakce [kN]
$R_z$	svislá reakce [kN]
$RD$	rostlé dřevo
$T_0$	výchozí teplota prvku v čase zabudování konstrukce [°C]
$T_{e,max}$	maximální rovnoměrná složka teploty mostu [°C]
$T_{e,min}$	minimální rovnoměrná složka teploty mostu [°C]
$T_{max}$	maximální teplota vzduchu ve stínu [°C]
$T_{min}$	minimální teplota vzduchu ve stínu [°C]
$TV$	třída vlhkosti
$V_{Ed}$	návrhová hodnota posouvající síly [kN]
$V_{přisl.}$	příslušná hodnota posouvající síly v konkrétní části prutu [kN]
$W_y$	průřezový modul k ose y [mm <sup>3</sup> ]
$W_z$	průřezový modul k ose z [mm <sup>3</sup> ]
$W_0$	průřezový modul čepu [mm <sup>3</sup> ]

*Písmena malé latinské abecedy*

$a$	účinná výška svaru [mm]
$a_1$	rozteč spojovacích prostředků rovnoběžně s vlákny [mm]
$a_2$	rozteč spojovacích prostředků kolmo k vláknům [mm]
$a_{3,c}$	vzdálenost spojovacího prostředku od nezatíženého konce [mm]
$a_{3,t}$	vzdálenost spojovacího prostředku od zatíženého konce [mm]
$a_{4,c}$	vzdálenost spojovacího prostředku od nezatíženého okraje [mm]



$a_{4,t}$	vzdálenost spojovacího prostředku od zatíženého okraje [mm]
$b$	šířka průřezu [mm]
$b_{ef}$	účinná šířka průřezu [mm]
$c_{dir}$	součinitel směru větru
$c_{season}$	součinitel ročního období
$c_f$	součinitel síly větru
$c_s c_d$	součinitel konstrukce
$c_r$	součinitel drsnosti terénu
$d$	průměr spojovacího prostředku [mm]
$d_0$	průměr otvoru [mm]
$e$	excentricita [mm]
$e_1$	vzdálenost spoj. prostředku od okraje plechu ve směru zatížení [mm]
$e_2$	vzdálenost spoj. prostředku od okraje plechu kolmo na směr zat. [mm]
$f_{h,k}$	charakteristická pevnost v otláčení [MPa]
$f_{m,k}$	charakteristická pevnost v ohybu [MPa]
$f_{m,d}$	návrhová pevnost v ohybu [MPa]
$f_{t,0,k}$	charakteristická pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny [MPa]
$f_{t,0,d}$	návrhová pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny [MPa]
$f_{c,0,k}$	charakteristická pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny [MPa]
$f_{c,0,d}$	návrhová pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny [MPa]
$f_{c,90,k}$	charakteristická pevnost v tlaku kolmo k vláknům [MPa]
$f_{c,90,d}$	návrhová pevnost v tlaku kolmo k vláknům [MPa]

$f_{v,k}$	charakteristická pevnost ve smyku [MPa]
$f_{v,d}$	návrhová pevnost ve smyku [MPa]
$f_u$	mez pevnosti [MPa]
$f_y$	mez kluzu [MPa]
$g_k$	charakteristická hodnota stálého zatížení [kN/m]
$h$	výška průřezu [mm]
$i_y$	poloměr setrvačnosti k ose y [mm]
$i_z$	poloměr setrvačnosti k ose z [mm]
$k_{cr}$	redukční součinitel trhlin pro únosnost ve smyku
$k_{def}$	součinitel dotvarování
$k_m$	součinitel zohledňující redistribuci ohybových napětí v průřezu
$k_{mod}$	modifikační součinitel zohledňující vliv trvání zatížení a vlhkosti
$k_{c,y(z)}$	součinitel vzpěrnosti
$k_{y(z)}$	součinitel vzpěrnosti
$l$	délka spojovacího prostředku [mm]
$n$	počet spojovacích prostředků
$n_1$	počet spojovacích prostředků v 1 řadě
$n_{řad}$	počet řad spojovacích prostředků
$p_1$	vzdálenost mezi spoj. prostředky ve směru zatížení [mm]
$p_2$	vzdálenost mezi spoj. prostředky kolmo na směr zatížení [mm]
$q_k$	charakteristická hodnota užitého zatížení [kN/m]
$q_p$	charakteristický maximální dynamický tlak [kN/m <sup>2</sup> ]

$s_k$	charakteristická hodnota zatížení sněhem [kN/m]
$t_1$	hloubka vniku spojovacího prostředku [mm]
$t_p$	tloušťka plechu [mm]
$t_{p,1}$	tloušťka čepového plechu [mm]
$tl$	tloušťka prvku [mm]
$u_{inst}$	okamžitý vodorovný průhyb [mm]
$u_{fin}$	finální vodorovný průhyb [mm]
$v_{b,0}$	výchozí základní rychlost větru [m/s]
$v_m$	střední rychlost větru [m/s]
$w_k$	výsledný tlak větru [kN/m <sup>2</sup> ]
$w_{inst}$	okamžitý svislý průhyb [mm]
$w_{fin}$	finální svislý průhyb [mm]
$z_0$	parametr drsnosti terénu
$z_{min}$	minimální výška

*Písmena malé řecké abecedy*

$\alpha$	úhel mezi silou a směrem vláken [°]
$\beta_w$	korekční součinitel pro svařování oceli S355
$\gamma_M$	dílčí součinitel vlastností materiálu
$\gamma_G$	součinitel bezpečnosti pro stálé zatížení
$\gamma_Q$	součinitel bezpečnosti pro užitné zatížení
$\Delta T_{N,con}$	char. hodnota rozsahu rovnoměrné složky teploty pro zkrácení [°C]

$\Delta T_{N,exp}$	char. hodnota rozsahu rovnoměrné složky teploty pro prodloužení [°C]
$\lambda_y$	štíhlostní poměr k ose y
$\lambda_z$	štíhlostní poměr k ose z
$\lambda_{rel,y}$	poměrný štíhlostní poměr k ose y
$\lambda_{rel,z}$	poměrný štíhlostní poměr k ose z
$\rho_k$	charakteristická hustota
$\sigma_{m,y,d}$	návrhové napětí v ohybu k ose y [MPa]
$\sigma_{m,z,d}$	návrhové napětí v ohybu k ose z [MPa]
$\sigma_{c,0,d}$	návrhové napětí v tlaku rovnoběžně s vlákny [MPa]
$\sigma_{c,90,d}$	návrhové napětí v tlaku kolmo k vláknům [MPa]
$\sigma_{t,0,d}$	návrhové napětí v tau rovnoběžně s vlákny [MPa]
$\sigma_{\perp}$	napětí ve svaru kolmo na jeho délku [MPa]
$\sigma_w$	výsledné napětí ve svaru [MPa]
$\tau_{v,d}$	návrhové napětí ve smyku [MPa]
$\tau_{\parallel}$	napětí ve svaru po délce [MPa]
$\tau_{\perp}$	napětí ve svaru kolmo na jeho délku [MPa]

# OBSAH

1. ÚVOD .....	- 1 -
2. CÍL PRÁCE.....	- 2 -
3. REŠERŠE KONSTRUKČNÍCH SYSTÉMŮ .....	- 3 -
3.1. Historie .....	- 3 -
3.1.1. Bubnový most .....	- 3 -
3.1.2. Kintai .....	- 4 -
3.1.3. Matematický most .....	- 5 -
3.1.4. Krytý most v Cogan House .....	- 6 -
3.2. Současnost.....	- 7 -
3.2.1. Trámové plnostěnné konstrukce.....	- 7 -
3.2.2. Trámové příhradové konstrukce.....	- 8 -
3.2.3. Obloukové konstrukce.....	- 9 -
3.2.4. Vzpínadlová konstrukce .....	- 12 -
3.2.5. Visuté pásové konstrukce .....	- 12 -
4. NAVRŽENÉ VARIANTY .....	- 14 -
4.1. Varianta – Oblouk .....	- 14 -
4.1.1. Předběžný výpočet - oblouk.....	- 15 -
4.1.2. Předběžný výpočet - hlavní nosník .....	- 19 -
4.1.3. Předběžný návrh závěsů .....	- 22 -
4.2. Varianta – Věšadlo .....	- 23 -
4.2.1. Předběžný výpočet pásů a diagonál .....	- 24 -
4.2.2. Vnitřní síly a posouzení sloupků .....	- 27 -
4.3. Varianta – Příhrada.....	- 30 -
4.3.1. Předběžný výpočet - horní pás .....	- 31 -
4.4. Volba optimální varianty → Oblouk .....	- 33 -
5. CHARAKTERISTIKA NAVRŽENÉ KONSTRUKCE.....	- 35 -

5.1. Základní geometrické údaje .....	- 36 -
5.2. Materiálové charakteristiky .....	- 36 -
5.3. Výpočet zatížení .....	- 37 -
5.3.1. Stálé zatížení .....	- 38 -
5.3.2. Zatížení od dopravy .....	- 38 -
5.3.3. Sníh .....	- 39 -
5.3.4. Vítr .....	- 39 -
5.3.5. Teplota .....	- 41 -
5.4. Kombinace zatížení .....	- 42 -
5.5. Výpočetní model .....	- 46 -
6. NÁVRH A POSUDEK NOSNÝCH PRVKŮ .....	- 47 -
6.1. Mostiny .....	- 47 -
6.2. Oblouk .....	- 49 -
6.3. Hlavní nosník .....	- 54 -
6.4. Závěsy .....	- 57 -
6.5. Příčník (v mostovce) .....	- 57 -
6.6. Příčník (v oblouku) .....	- 59 -
6.7. Ztužidlo (v oblouku) .....	- 62 -
6.8. Ztužidlo (v mostovce) .....	- 64 -
6.8.1. Táhlo Macalloy .....	- 64 -
6.8.2. Dřevěný hranol .....	- 65 -
6.9. Podélník .....	- 68 -
7. NÁVRH A POSUDEK SPOJŮ .....	- 71 -
7.1. Čep ve vrcholu oblouku .....	- 72 -
7.2. Spoj oblouku a hlavního nosníku s kotvicím čepem .....	- 81 -
7.3. Přípoj závěsu k oblouku .....	- 92 -
7.4. Spoj příčníku a hlavního nosníku .....	- 96 -

7.5. Montážní spoj hlavního nosníku .....	- 100 -
7.6. Montážní spoj oblouku.....	- 104 -
8. MODÁLNÍ ANALÝZA.....	- 108 -
8. MONTÁŽ LÁVKY .....	- 110 -
9. ZÁVĚR.....	- 111 -
10. SEZNAM OBRÁZKŮ .....	- 112 -
11. SEZNAM TABULEK.....	- 115 -
12. SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ .....	- 116 -
13. SEZNAM PŘÍLOH .....	- 118 -
14. PŘÍLOHY .....	- 119 -

# 1. ÚVOD

Když lidé narazili při cestování na přírodní překážky, jako jsou řeky a kaňony, snažili se uvedené přírodní bariéry překonávat. Takto dali vzniknout prvním dřevěným lávkám, které byly tvořeny spadlými kmeny stromů. Na podporu dřevěných mostů využívali převážně kameny. Dřevěné konstrukce podpírané kameny však neměly velkou nosnost ani trvanlivost a byly často odneseny rozbouřenou řekou při povodni.

Časem se však lidé naučili přírodním živlům vzdorovat nesrovnatelně lépe. Staří Římané byli skvělými staviteli, kteří budovali působivé kamenné obloukové mosty a akvadukty. Některé z nich se dochovaly až do současnosti. V podobném čase se Římanům ve stavbě kamenných mostů dokázali rovnat pouze Číňané.

V jihoamerických Andách zase místní Inkové stavěli dlouhé lanové mosty přes hluboké strže. Zde se jako hlavní nosná lana používaly dužnaté listy agáve. Lana z agáve mohla dosahovat až tloušťky lidského těla [23].

V dnešní době umožnil rozvoj technologií a znalosti materiálů budovat spektakulární inženýrské objekty, jimž vévodily a vévodit budou mosty. Pro mostní konstrukce je příznačné využívání kombinace několika materiálů. Beton ve spojení s ocelí se uplatňuje zejména při stavbách současných silničních a železničních mostů. Mosty pro pěší a cyklisty, tedy lávky, se často budují s dřevěnou nosnou konstrukcí. Dřevěná nosná konstrukce bývá nejčastěji vyrobena z lepených lamelových průřezů ať už jako masivní plnostěnné nosníky, příhradové nebo obloukové konstrukce. Značnou devízou obecně dřevěných konstrukcí je zvýšená vnímavost současné společnosti k ekologii a trvale udržitelnému rozvoji. Neopomeneme-li estetický charakter a zmíněné společenské trendy, zvýšený zájem nejenom o lávky, ale i silniční mosty ze dřeva, nás nemůže překvapit [24].

Předložená diplomová práce se zabývá první navrženou variantou obloukové lávky z lepeného lamelového dřeva. Konstrukce lávky se klene nad řekou Olší na periferii města Karviné. Realizací uvedeného objektu by došlo k propojení městských částí Karviná - Staré Město a Karviná - Sovinec.



## 2. CÍL PRÁCE

Hlavním cílem předložené diplomové práce bylo vytvoření koncepce uceleného obrazu o historii a současnosti konstrukčních systémů dřevěných mostů pro pěší a cyklisty. Záměrem bylo na základě rešerše předložit návrh tří možností konstrukčního systému lávek přes vodoteč o rozpětí minimálně 30 m, z nichž bude zpracován návrh rozhodujících nosných prvků a spojů (včetně ztužidel) pro jednu zvolenou variantu. Návrhy a posudky byly prováděny podle požadavků norem [8] a [9]. Prostorové uspořádání lávky bylo navrženo podle regulí norem [12] a [13]. Součástí diplomové práce je rovněž výkresová dokumentace pro stavební řízení, návrh možného způsobu založení a vhodný způsob montáže lávky. Pro výpočet vnitřních sil a deformací konstrukce byl použit software Scia Engineer 2014. Výkresy, detaily spojů a pomocné náčrty byly kresleny v programu AutoCAD Architecture 2014. Statický výpočet byl proveden v tabulkovém procesoru Microsoft Excel 2010.

## 3. REŠERŠE KONSTRUKČNÍCH SYSTÉMŮ

### 3.1. Historie

#### 3.1.1. Bubnový most

Díky polokruhovému tvaru, který svým odrazem na klidné hladině vytváří dojem plného kruhu, se mostu říká také měsíční. Tradičně se tyto formy mostu objevují v Japonsku nebo v japonských zahradách. Tento exemplář se nachází v sanfranciském Golden Gate Parku v expozici Japonská vesnice a byl vybudován v roce 1894 [24].

Ze statického hlediska se jedná o obloukovou konstrukci tvořenou pěti zahnutými dřevěnými nosníky. Výstavbu postihl problém v podobě nevhodného typu dřeva na americkém kontinentu, a tak byl stavitel Šinšiči Nakatani donucen vrátit se do rodného Japonska, kde se mu podařilo most sestojit. Následně jej rozebraný přepravil lodí do San Francisca, kde jej dal znovu dohromady.



Obrázek 1: Bubnový most v San Franciscu (Foto: W. Chou)

### 3.1.2. Kintai

Kintai-kjó je druhým zástupcem japonského mostního stavitelství v této rešerši. Jedná se o 196 m dlouhý most pro pěší tvořený pěti oblouky o rozpětí přibližně 35 m. Most byl vybudován v 17. století a zprvu sloužil pouze pro přechod samurajů mezi čtvrtěmi města Iwakuni. Dřevěná mostovka je široká 5 m a složitou nosnou konstrukci drží pohromadě kovové pásy a svorky bez jediného hřebíku. Most je podpírán kamennými pilíři postavenými na dně řeky Nišiki. Časté záplavy byly důvodem pro jeho klenutý tvar, čímž se předešlo hromadění naplavenin. Ty v minulosti dokázaly porušit několik předchůdců tohoto mostu. Pro svůj osobitý vzhled získal název „brokátový pás“, který se tradičně nosí přes kimono [24].



Obrázek 2: Oblouky mostu Kintai a detail konstrukce [17]



### 3.1.3. Matematický most

Matematický most je dřevěná lávka spojující dvě části Královny koleje, která je součástí slavné univerzity v Cambridgi v Anglii. Lávka byla postavena v roce 1749 [24]. Jedná se o příhradovou konstrukci s dolní mostovkou, tvořenou dvěma hlavními nosníky. Podélné trámy hlavních nosníků jsou v podstatě tečnami křivky oblouku. Hlavní nosníky jsou propojeny radiálně uspořádanými polorámy, které zajišťují prostorovou tuhost konstrukce. Zajímavostí je, že v místech křížení jednotlivých dílů mostu jsou šrouby navrženy tak, aby na ně nepůsobilo žádné zatížení. Matematický most dostal svůj název podle několika legend, z nichž dnes žádnou nejsme schopni potvrdit. Jednou z nich, která stojí za zmínku je ta, že most byl původně sestrojen studenty univerzity tak, že držel pohromadě pouze vlastní tíhou a díky úhlům v jakých byly díly sestaveny.



Obrázek 3: Matematický most v Cambridge [18]

### 3.1.4. Krytý most v Cogan House

„Cogan House Covered Bridge“ jak zní název mostu v anglickém originále je konstrukce překonávající říčku Larrys na severovýchodě amerického státu Pensylvánie. Tento most byl postaven na konci 19. století jako přechod pro vozy, dobytek a pěší. Most se dodnes využívá jako součást polní cesty a denně přes něj přejede v průměru 10 aut. Ta jsou při průjezdu omezena jeho světlou výškou 2,6 m. Z historického hlediska bylo zastřešení mostu důležité nejen z důvodu prodloužení jeho životnosti, ale také poskytování přístřeší pocestným.

Stavitelem mostu byl místní občan Valentine Meyer, který zvolil jako nosnou konstrukci Burrův obloukový příhradový nosník. Tento typ konstrukce byl běžný pro stavbu krytých mostů. Statika mostu je založena na přenesení vlastní tíhy konstrukce obloukem, zatímco příhradovina ji zpevňuje a dodává jí tak větší stabilitu a nosnost. Kombinací těchto dvou statických složek bylo dosaženo synergického účinku, a tedy vyšší celkové únosnosti mostu. Přilehlé lesy v okolí poskytly stavební materiál, jímž bylo borovicové dřevo [24].



Obrázek 4: Krytý most v Cogan House [19]



## 3.2. Současnost

V dnešní době se u dřevěných lávek uplatňuje široká škála konstrukčních systémů. Volbou vhodného z nich se s vysokou pravděpodobností stává konkrétní návrh mostu nejvýhodnějším ekonomickým řešením. Tento faktor je momentálně pro investora klíčovým. Vlivem, který může ovlivnit upozadění finančního hlediska je harmonické zapadnutí lávky v rázu okolní krajiny, tedy celkový estetický dojem.

Ze statického hlediska ovlivňuje výběr konstrukčního systému jednoznačně rozpětí, které je zapotřebí překlenout, šířka průchozího prostoru, oblast výstavby (klimatická zatížení), případně dostupnost materiálu a náročnost jeho přepravy a montáže.

Rešerše lávek ze současnosti byla rozdělena do skupin podle konstrukčních systémů.

### 3.2.1. Trámové plnostěnné konstrukce

- Rozpětí: do 25 m
- Materiál: LLD



Obrázek 5: Lávka v GOLF RESORT v Praze (Foto: TESKO Praha)



Obrázek 6: Lávka v Karlových Varech (Foto: TESKO Praha)

### 3.2.2. Trámové příhradové konstrukce

- Rozpětí: 15 až 30 *m*
- Materiál: LLD, rostlé dřevo



Obrázek 7: Lávka v Českých Budějovicích (Foto: TESKO Praha)





Obrázek 8: Lávka přes Úpu (Foto: TAROS NOVA)

### 3.2.3. Obloukové konstrukce

#### *Leonardův most*

Leonardův most je jedním z nejlepších příkladů splynutí konstrukce s okolní krajinou. Tato lávka se klene nad jednou norskou dálnicí u města Ås nacházejícího se přibližně 20 *km* od hlavního města Oslo. Konstrukce tohoto bezesporu uměleckého díla byla inspirována náčrtem mostu Leonarda da Vinciho, který jej navrhl jako kamenný most přes Bospor v Cařihradu (dnešním Istanbulu) roku 1502.

Da Vinciho původní záměr měl překonat rozpětí o délce 234 *m* a počítal se světlou výškou okolo 40 *m*. Stávající oblouk v Norsku je o dost menší, jeho rozpětí je 40 *m* a světlá výška 5,7 *m*. Celková délka lávky je 120 *m*. Hlavní nosný oblouk poskytuje oporu horní mostovce, zatímco dva krajní oblouky zajišťují jeho prostorovou stabilitu. Obloukové nosníky byly vyrobeny z lepeného lamelového dřeva, přičemž zaoblení a tvar průřezu je dílem počítačem řízených brusek.



Leonardův most má v Norsku také jednu výjimku. Jeho životnost je stanovena na 40 let, ačkoli zákon přikazuje minimální životnost mostu 100 let. Té však nebylo možné dosáhnout [24].



Obrázek 9: Leonardův most, Norsko [20]

### *Obloukové lávky s dolní mostovkou – Česká republika*

Na území České republiky se můžeme běžně setkat s dřevěnými lávkami s dolní mostovkou. Na první pohled se mohou zdát tyto konstrukce velmi podobné. Pravdou je, že ze statického hlediska se od sebe v některých ohledech výrazně liší. Jednotlivé rozdíly jsou níže rozebrány na příkladech konstrukcí z obrázků 10 - 12.

Společným znakem je hlavní nosná konstrukce ze dvou obloukových nosníků. Pro jejich správné fungování je zapotřebí zajistit vzájemné ztužení. V případech na obr. 10 a 12 ztužení obstarávají příčné obrácené polorámy. Nutnost respektování minimální průchozí výšky 2,5 m neumožňuje spojení oblouků v horní části, což je zapříčiněno jejich plochostí. Tento problém se netýká lávky na obr. 11, kde díky dostatečnému vyklenutí oblouků, si můžeme všimnout spojovacího prvku v jejich vrcholu. Druhým citelným rozdílem, na který je vhodné upozornit, je použití táhla pro spojení konců oblouku na obr. 10 a 11, resp. jeho nepřítomnost (obr. 12). Táhlo zachycuje horizontální tlaky z oblouku, kterým by musela odolávat základová konstrukce. Popsaným způsobem jsou sníženy nároky na spodní stavbu.



Obrázek 10: Lávka v Dolním Němčí (Foto: CB s.r.o.)



Obrázek 11: Lávka ve Slavkově u Brna (Foto: CB s.r.o.)



Obrázek 12: Lávka v Souticích (Foto: CB s.r.o.)

### 3.2.4. Vzpínadlová konstrukce

Typickým příkladem tohoto konstrukčního systému je lávka v norském Lardal. Celková délka mostu je 130 m, střední pole má rozpětí 92 m. Na výrobu mostu se použilo lepené lamelové dřevo impregnované térovým olejem. Ve středním poli lávku ztužuje konstrukce vzpínadla, kde je využita kombinace dřevěných tlačných prvků a ocelových táhel. Jedná se o velmi dlouhou štíhlou konstrukci, kterou provází problémy s dynamickými účinky [25].



Obrázek 13: Lávka v Lardal, Norsko (Foto: A. Rönnquist)

### 3.2.5. Visuté pásové konstrukce

#### *Most v Essingu*

Jedná se o lávku pro pěší velmi originálního tvaru, která se klene nad kanálem Rýn-Mohan-Dunaj v západním Německu. Most spojuje vesnici Essing s přírodním parkem Altmühl na druhém břehu kanálu a je důležitým orientačním bodem pro turisty, cyklisty i vodáky. Jeho celková délka je 190 m [24].

Podporami mostu jsou příhradové vzpěry z LLD. Samotnou mostovku lávky nese visutá pásová konstrukce. To znamená, že přes údolí je natažena dvojice ocelových lan, která jsou při montáži zatížena závažími. Tím se do ocelových lan vnese napětí. Po přidání všech modulů mostovky na lana se závaží odstraní. Lana mají tendenci se vrátit do svého původního tvaru a tím začínají stlačovat dřevěné moduly mostovky k sobě. Tímto způsobem je dosaženo



větší pevnosti lávky a zamezeno pro lidi nepříjemnému pohupování konstrukce. Výsledný projekt má tvar řetězovky.



Obrázek 14: Lávka v Essingu, Německo [21]

### *Lávka Rádlo u Jablonce nad Nisou*

Z názvu lávky je její umístění zřejmé. Tato konstrukce je 59 m dlouhá a šířka mostovky je 3,8 m. Materiál a nosný systém ve tvaru řetězovky je v podstatě totožný s mostem v Essingu. Lana jsou kotvena do skalního masivu. Střední pilíř funguje jako kyvná stojka.



Obrázek 15: Lávka Rádlo u Jablonce nad Nisou (Foto: TESKO Praha)

## 4. NAVRŽENÉ VARIANTY

V rámci diplomové práce byly vypracovány tři návrhy konstrukčních systémů dřevěné lávky. Všechny varianty mají stejné rozpětí 30 m. Hlavní nosná konstrukce se vždy skládá z masivních profilů z LLD, pro menší prvky bylo použito rostlé dřevo a jako některé ztužující prvky zde působí ocelová táhla.

### 4.1. Varianta – Oblouk

Stěžejními nosnými prvky této varianty je dvojice trojkloubových oblouků z LLD. Propojení oblouků zajišťují příčníky, jejichž rozteče jsou vyplněny ztužidly ve tvaru obráceného V. Na oblouky je šikmo pod úhlem 35° (od svislice) zavěšen systém táhel Macalloy tak, aby bylo příznivěji rozneseno ohybové napětí v obloucích [25]. Zeleně označené hlavní nosníky z LLD fungují jako táhla, a tím snižují nároky na základovou konstrukci [25]. Hlavní nosníky konstrukce jsou spojeny příčníky o rozteči 3,75 m.

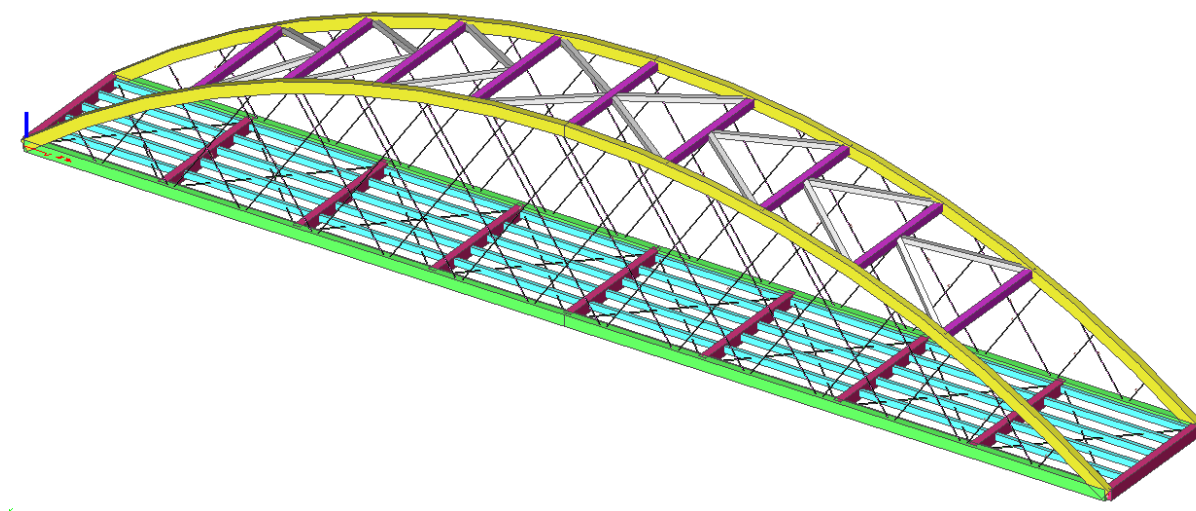
Pro ztužení mostovky byly navrženy a porovnány 2 varianty ztužidel. První uvažovaná možnost byla modelována z dvojice táhel Macalloy. Použitím tenkých táhel by bylo možné připojit podélníky mezi příčníky a získat tak vyšší průchozí prostor. Druhá varianta byla vytvořena z dřevěných hranolů tvořící vodorovný příhradový nosník. Nutnost položení podélníků na příčníky sice snížila průchozí výšku, avšak z hlediska tuhosti konstrukce byly získány příznivější hodnoty vodorovných deformací.

#### Geometrické údaje:

- rozpětí: 30 m
- šířka mostovky: 3,75 m
- vzepětí oblouku: 5 m
- průchozí výška: 2,7 m

#### Předběžný odhad profilů:

- oblouk: 200/300 mm
- hlavní nosník: 200/300 mm
- táhlo - závěsy:  $\phi$  15 mm



Obrázek 16: Model varianty Oblouk

Konstrukce byla zatížena vlastní tíhou a spojitým zatížením od dopravy  $q_{f,k} = 5 \text{ kN/m}^2$  [6], které bylo rozpočítáno na jednotlivé podélníky s roztečí  $0,68 \text{ m}$ . V programu Scia Engineer byl proveden nelineární výpočet z důvodu vyloučení tlaku v táhlech [14].

#### 4.1.1. Předběžný výpočet - oblouk

$$N_{max} = -257,61 \text{ kN}$$

$$V_{z,max} = 13,27 \text{ kN}$$

$$M_{y,max} = 9,37 \text{ kNm}$$

$$M_{z,max} = 1,87 \text{ kNm}$$

$$M_{x,max} = 0,30 \text{ kNm}$$

#### Únosnost v dvojosém ohybu

$$W_y = \frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2 = \frac{1}{6} \cdot 200 \cdot 300^2 = 3 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

$$W_z = \frac{1}{6} \cdot h \cdot b^2 = \frac{1}{6} \cdot 300 \cdot 200^2 = 2 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

$$f_{m,k} = 24,0 \text{ MPa}$$

$$\gamma_m = 1,25$$

$$k_{mod} = 0,7 \text{ (LLD, krátkodobé zatížení, třída provozu 3)}$$

$$k_m = 0,7 \text{ (součinitel vlivu nehomogenit obdélníkového průřezu a redistribuce napětí)}$$

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{m,k}}{\gamma_m} = \frac{0,7 \cdot 24,0}{1,25} = 13,44 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,max}}{W_y} = \frac{9,37 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^6} = 3,12 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_{z,max}}{W_z} = \frac{1,87 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^6} = 0,94 \text{ MPa}$$

**Posudek MSÚ:**

$$k_M \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} = 0,7 \cdot \frac{3,12}{13,44} + \frac{0,97}{13,44} = 0,23 \leq 1$$

VYHOVUJE

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} + k_M \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} = \frac{3,12}{13,44} + 0,7 \cdot \frac{0,97}{13,44} = 0,28 \leq 1$$

VYHOVUJE

### *Únosnost ve smyku*

$$A = b \cdot h = 200 \cdot 300 = 6 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$$

$$f_{v,k} = 2,7 \text{ MPa}$$

$$\gamma_m = 1,25$$

$$k_{mod} = 0,7 \text{ (LLD, krátkodobé zatížení, třída provozu 3)}$$

$$k_{cr} = 0,67 \text{ (součinitel vlivu výsušných trhlin)}$$

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_m} = \frac{0,7 \cdot 2,7}{1,25} = 1,51 \text{ MPa}$$

$$\tau_{v,d} = \frac{1,5 \cdot V_{z,max}}{k_{cr} \cdot A} = \frac{1,5 \cdot 13,27 \cdot 10^3}{0,67 \cdot 6 \cdot 10^4} = 0,50 \text{ MPa}$$

**Posudek MSÚ:**

$$\tau_{v,d} = 0,50 \text{ MPa} < f_{v,d} = 1,51 \text{ MPa}$$

VYHOVUJE

### *Únosnost v tlaku*

$$A = b \cdot h = 200 \cdot 300 = 6 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$$

$$f_{c,0,k} = 24,0 \text{ MPa}$$

$$\gamma_m = 1,25$$

$$k_{mod} = 0,7 \text{ (LLD, krátkodobé zatížení, třída provozu 3)}$$

$$f_{c,0,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_m} = \frac{0,7 \cdot 24,0}{1,25} = 13,44 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{max}}{A} = \frac{257,61 \cdot 10^3}{6 \cdot 10^4} = 4,29 \text{ MPa}$$

**Posudek MSÚ:**

$$\sigma_{c,0,d} = 4,29 \text{ MPa} < f_{c,0,d} = 13,44 \text{ MPa}$$

VYHOVUJE

### *Únosnost v kroucení*

$$h/b = 300/200 = 1,5$$

$$\beta = 0,231 \text{ (bezrozměrný součinitel)}$$

$$W_t = \beta \cdot h \cdot b^2 = 0,231 \cdot 300 \cdot 200^2 = 2,77 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$



$$f_{v,k} = 2,7 \text{ MPa}$$

$$\gamma_m = 1,25$$

$$k_{mod} = 0,7 \text{ (LLD, krátkodobé zatížení, třída provozu 3)}$$

$$k_{shape} = \min \left\{ 1 + 0,15 \cdot \frac{h}{b} = 1 + 0,15 \cdot 1,5 = 1,225 \right\} = 1,225$$

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_m} = \frac{0,7 \cdot 2,7}{1,25} = 1,51 \text{ MPa}$$

$$\tau_{tor,d} = \frac{M_{x,max}}{W_t} = \frac{0,30 \cdot 10^6}{2,77 \cdot 10^6} = 0,11 \text{ MPa}$$

#### Posudek MSÚ:

$$\tau_{tor,d} = 0,11 \text{ MPa} < k_{shape} \cdot f_{v,d} = 1,225 \cdot 1,51 = 1,85 \text{ MPa}$$

VYHOVUJE

#### Posudek MSP:

- okamžitý průhyb:

$$w_{inst} = 22,7 \text{ mm} < \frac{L}{500} = \frac{30000}{500} = 60,0 \text{ mm}$$

VYHOVUJE

Součinitel zohledňující zvětšení deformací v čase následkem dotvarování a vlhkosti pro třídu provozu 3:  $k_{def} = 2,0$ .

- konečný průhyb:

$$w_{fin} = (1 + k_{def}) \cdot w_{inst} = (1 + 2) \cdot 22,7 = 68,1 \text{ mm}$$

$$w_{fin} = 68,1 \text{ mm} < \frac{L}{250} = \frac{30000}{250} = 120,0 \text{ mm}$$

VYHOVUJE

#### 4.1.2. Předběžný výpočet - hlavní nosník

$$N_{max} = 190,44 \text{ kN}$$

$$V_{z,max} = 31,84 \text{ kN}$$

$$M_{y,max} = 19,11 \text{ kNm}$$

$$M_{z,max} = 1,42 \text{ kNm}$$

$$M_{x,max} = 0,26 \text{ kNm}$$

##### Únosnost v dvojosém ohybu

$$W_y = \frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2 = \frac{1}{6} \cdot 200 \cdot 300^2 = 3 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

$$W_z = \frac{1}{6} \cdot h \cdot b^2 = \frac{1}{6} \cdot 300 \cdot 200^2 = 2 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

$$f_{m,k} = 24,0 \text{ MPa}$$

$$\gamma_m = 1,25$$

$$k_{mod} = 0,7 \text{ (LLD, krátkodobé zatížení, třída provozu 3)}$$

$$k_m = 0,7 \text{ (součinitel vlivu nehomogenit obdélníkového průřezu a redistribuce napětí)}$$

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{m,k}}{\gamma_m} = \frac{0,7 \cdot 24,0}{1,25} = 13,44 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,max}}{W_y} = \frac{19,11 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^6} = 6,37 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_{z,max}}{W_z} = \frac{1,42 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^6} = 0,71 \text{ MPa}$$

**Posudek MSÚ:**

$$k_M \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} = 0,7 \cdot \frac{6,37}{13,44} + \frac{0,71}{13,44} = 0,38 \leq 1$$

VYHOVUJE

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} + k_M \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} = \frac{6,37}{13,44} + 0,7 \cdot \frac{0,71}{13,44} = 0,51 \leq 1$$

VYHOVUJE

**Únosnost ve smyku**

$$A = b \cdot h = 200 \cdot 300 = 6 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$$

$$f_{v,k} = 2,7 \text{ MPa}$$

$$\gamma_m = 1,25$$

$$k_{mod} = 0,7 \text{ (LLD, krátkodobé zatížení, třída provozu 3)}$$

$$k_{cr} = 0,67 \text{ (součinitel vlivu výsušných trhlin)}$$

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_m} = \frac{0,7 \cdot 2,7}{1,25} = 1,51 \text{ MPa}$$

$$\tau_{v,d} = \frac{1,5 \cdot V_{z,max}}{k_{cr} \cdot A} = \frac{1,5 \cdot 31,84 \cdot 10^3}{0,67 \cdot 6 \cdot 10^4} = 1,19 \text{ MPa}$$

**Posudek MSÚ:**

$$\tau_{v,d} = 1,19 \text{ MPa} < f_{v,d} = 1,51 \text{ MPa}$$

VYHOVUJE

**Únosnost v tahu**

$$A = b \cdot h = 200 \cdot 300 = 6 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$$

$$f_{t,0,k} = 16,5 \text{ MPa}$$

$$\gamma_m = 1,25$$

$$k_{mod} = 0,7 \text{ (LLD, krátkodobé zatížení, třída provozu 3)}$$

$$f_{t,0,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_m} = \frac{0,7 \cdot 16,5}{1,25} = 9,24 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{max}}{A} = \frac{190,44 \cdot 10^3}{6 \cdot 10^4} = 3,17 \text{ MPa}$$

**Posudek MSÚ:**

$$\sigma_{t,0,d} = 3,17 \text{ MPa} < f_{t,0,d} = 9,24 \text{ MPa}$$

VYHOVUJE

### *Únosnost v kroucení*

$$h/b = 300/200 = 1,5$$

$$\beta = 0,231 \text{ (bezrozměrný součinitel)}$$

$$W_t = \beta \cdot h \cdot b^2 = 0,231 \cdot 300 \cdot 200^2 = 2,77 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

$$f_{v,k} = 2,7 \text{ MPa}$$

$$\gamma_m = 1,25$$

$$k_{mod} = 0,7 \text{ (LLD, krátkodobé zatížení, třída provozu 3)}$$

$$k_{shape} = \min \left\{ 1 + 0,15 \cdot \frac{h}{b}, 2 \right\} = 1 + 0,15 \cdot 1,5 = 1,225$$

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_m} = \frac{0,7 \cdot 2,7}{1,25} = 1,51 \text{ MPa}$$

$$\tau_{tor,d} = \frac{M_{x,max}}{W_t} = \frac{0,26 \cdot 10^6}{2,77 \cdot 10^6} = 0,09 \text{ MPa}$$

**Posudek MSÚ:**

$$\tau_{v,d} = 0,09 \text{ MPa} < k_{shape} \cdot f_{v,d} = 1,225 \cdot 1,51 = 1,85 \text{ MPa}$$

VYHOVUJE

### Posudek MSP:

- okamžitý průhyb:

$$w_{inst} = 28,8 \text{ mm} < \frac{L}{500} = \frac{30000}{500} = 60,0 \text{ mm} \quad \text{VYHOVUJE}$$

Součinitel zohledňující zvětšení deformací v čase následkem dotvarování a vlhkosti pro třídu provozu 3:  $k_{def} = 2,0$ .

- konečný průhyb:

$$w_{fin} = (1 + k_{def}) \cdot w_{inst} = (1 + 2) \cdot 28,8 = 86,4 \text{ mm}$$

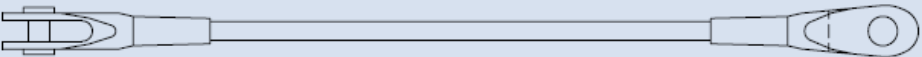
$$w_{fin} = 86,4 \text{ mm} < \frac{L}{250} = \frac{30000}{250} = 120,0 \text{ mm} \quad \text{VYHOVUJE}$$

### 4.1.3. Předběžný návrh závěsů

Byla navržena táhla  $\phi 15 \text{ mm}$  podle tabulek firmy Macalloy na  $N_{max} = 22,43 \text{ kN}$ .

Tabulka 1: Vlastnosti táhel Macalloy ve standardním provedení a v nerez provedení

Závít	jednotka	M10	M12	M16	M20	M24	M30	M36	M42	M48	M56	M64	M76	M85	M90*	M100*
Průměr táhla	mm	10	11	15	19	22	28	34	39	45	52	60	72	82	87	97
Minimální mez kluzu	kN	25	36	69	108	156	249	364	501	660	912	1204	1756	2239	2533	3172
Minimální mez pevnosti	kN	33	48	91	143	207	330	483	665	875	1209	1596	2329	2969	3358	4206
Hmotnost táhla	Kg/m	0,50	0,75	1,40	2,20	3,00	4,80	7,10	9,40	12,50	16,70	22,20	32,00	41,50	46,70	58,00



Obrázek 17: Tabulka s hodnotami pevností pro táhla Macalloy [16]

## 4.2. Varianta – Věšadlo

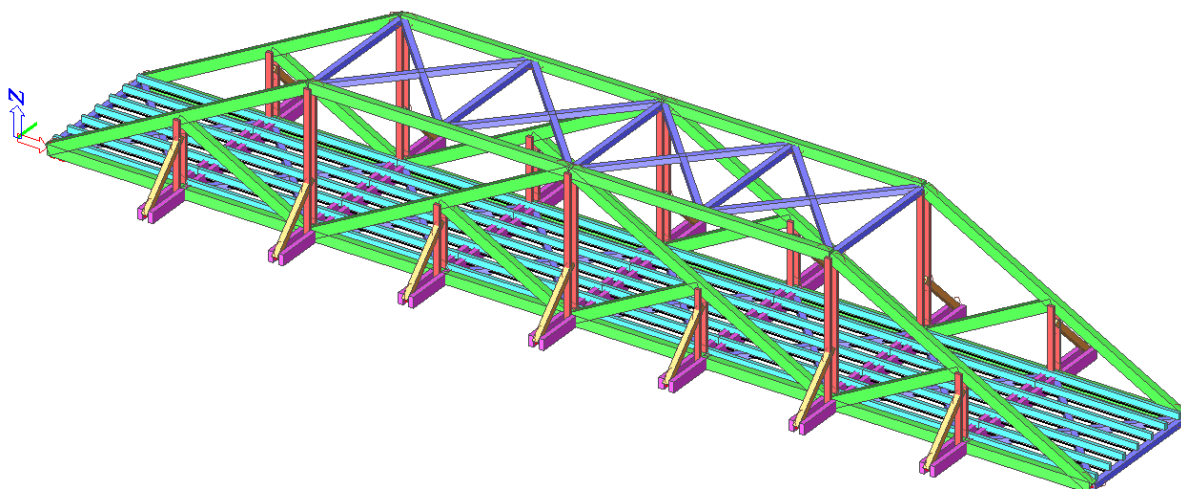
Hlavními nosnými prvky této varianty je dvojice věšadlových nosníků z LLD. Ztužení horních i dolních pásů zajišťují příčníky vyplněné dvojicemi překřížených prutů, které byly spojeny kámpováním a sešroubovány svorníkem. Pro diagonály byl z estetických důvodů zvolen shodný průřez z LLD jako pro pásy. Sloupky jsou tvořeny dvojicí profilů z RD, které odolávají především tahovému namáhání. Dvojice profilů velmi usnadňuje přípoj sloupků k pásům a diagonálám. Dolní příčníky byly navrženy rovněž z dvojice profilů a přesahují dolní pás o 1,5 m z obou stran. Šikmé vzpěry spojují konce dolních příčníků se sloupky a tím přispívají prostorové stabilitě konstrukce.

### Geometrické údaje:

- rozpětí: 30 m
- šířka mostovky: 4 m
- průchozí výška: 4 m

### Předběžný odhad profilů:

- pásy a diagonály: 200/300 mm
- sloupky:  $2 \times 80/160$  mm
- příčníky:  $2 \times 140/300$  mm



Obrázek 18: Model varianty Věšadlo

Konstrukce byla zatížena vlastní tíhou a spojitým zatížením od dopravy  $q_{f,k} = 5 \text{ kN/m}^2$  [6], které bylo rozpočítáno na jednotlivé podélníky s roztečí 0,6 m. Výpočet vnitřních sil byl proveden v programu Scia Engineer [14].

#### 4.2.1. Předběžný výpočet pásů a diagonál

$$N_{max} = 256,08 \text{ kN}$$

$$N_{min} = -318,09 \text{ kN}$$

$$M_{y,max} = 6,04 \text{ kNm}$$

$$M_{z,max} = 5,70 \text{ kNm}$$

$$M_{x,max} = 0,88 \text{ kNm}$$

#### Únosnost v dvojosém ohybu

$$W_y = \frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2 = \frac{1}{6} \cdot 200 \cdot 300^2 = 3 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

$$W_z = \frac{1}{6} \cdot h \cdot b^2 = \frac{1}{6} \cdot 300 \cdot 200^2 = 2 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

$$f_{m,k} = 24,0 \text{ MPa}$$

$$\gamma_m = 1,25$$

$$k_{mod} = 0,7 \text{ (LLD, krátkodobé zatížení, třída provozu 3)}$$

$$k_m = 0,7 \text{ (součinitel vlivu nehomogenit obdélníkového průřezu a redistribuce napětí)}$$

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{m,k}}{\gamma_m} = \frac{0,7 \cdot 24,0}{1,25} = 13,44 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,max}}{W_y} = \frac{6,04 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^6} = 2,01 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_{z,max}}{W_z} = \frac{5,70 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^6} = 2,85 \text{ MPa}$$

**Posudek MSÚ:**

$$k_M \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} = 0,7 \cdot \frac{2,01}{13,44} + \frac{2,85}{13,44} = 0,32 \leq 1 \quad \text{VYHOVUJE}$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} + k_M \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} = \frac{2,01}{13,44} + 0,7 \cdot \frac{2,85}{13,44} = 0,30 \leq 1 \quad \text{VYHOVUJE}$$

### *Únosnost v tahu*

$$A = b \cdot h = 200 \cdot 300 = 6 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$$

$$f_{t,0,k} = 16,5 \text{ MPa}$$

$$\gamma_m = 1,25$$

$$k_{mod} = 0,7 \text{ (LLD, krátkodobé zatížení, třída provozu 3)}$$

$$f_{t,0,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_m} = \frac{0,7 \cdot 16,5}{1,25} = 9,24 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{max}}{A} = \frac{25,08 \cdot 10^3}{6 \cdot 10^4} = 4,27 \text{ MPa}$$

**Posudek MSÚ:**

$$\sigma_{t,0,d} = 4,27 \text{ MPa} < f_{t,0,d} = 9,24 \text{ MPa} \quad \text{VYHOVUJE}$$

### *Únosnost v tlaku*

$$A = b \cdot h = 200 \cdot 300 = 6 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$$

$$f_{c,0,k} = 24,0 \text{ MPa}$$

$$\gamma_m = 1,25$$



$k_{mod} = 0,7$  (LLD, krátkodobé zatížení, třída provozu 3)

$$f_{c,0,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_m} = \frac{0,7 \cdot 24,0}{1,25} = 13,44 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{max}}{A} = \frac{318,09 \cdot 10^3}{6 \cdot 10^4} = 5,30 \text{ MPa}$$

**Posudek MSÚ:**

$$\sigma_{c,0,d} = 5,30 \text{ MPa} < f_{c,0,d} = 13,44 \text{ MPa}$$

VYHOVUJE

### Únosnost v kroucení

$$h/b = 300/200 = 1,5$$

$$\beta = 0,231 \text{ (bezrozměrný součinitel)}$$

$$W_t = \beta \cdot h \cdot b^2 = 0,231 \cdot 300 \cdot 200^2 = 2,77 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

$$f_{v,k} = 2,7 \text{ MPa}$$

$$\gamma_m = 1,25$$

$k_{mod} = 0,7$  (LLD, krátkodobé zatížení, třída provozu 3)

$$k_{shape} = \min \left\{ 1 + 0,15 \cdot \frac{h}{b} = 1 + 0,15 \cdot 1,5 = 1,225 \right\} = 1,225$$

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_m} = \frac{0,7 \cdot 2,7}{1,25} = 1,51 \text{ MPa}$$

$$\tau_{tor,d} = \frac{M_{x,max}}{W_t} = \frac{0,88 \cdot 10^6}{2,77 \cdot 10^6} = 0,32 \text{ MPa}$$

**Posudek MSÚ:**

$$\tau_{v,d} = 0,32 \text{ MPa} < k_{shape} \cdot f_{v,d} = 1,225 \cdot 1,51 = 1,85 \text{ MPa}$$

VYHOVUJE

### Posudek MSP – dolní pás:

- okamžitý průhyb:

$$w_{inst} = 35,7 \text{ mm} < \frac{L}{500} = \frac{30000}{500} = 60,0 \text{ mm} \quad \text{VYHOVUJE}$$

Součinitel zohledňující zvětšení deformací v čase následkem dotvarování a vlhkosti pro třídu provozu 3:  $k_{def} = 2,0$ .

- konečný průhyb:

$$w_{fin} = (1 + k_{def}) \cdot w_{inst} = (1 + 2) \cdot 35,7 = 107,1 \text{ mm}$$

$$w_{fin} = 107,1 \text{ mm} < \frac{L}{250} = \frac{30000}{250} = 120,0 \text{ mm} \quad \text{VYHOVUJE}$$

### 4.2.2. Vnitřní síly a posouzení sloupků

$$N_{max} = 135,62 \text{ kN}$$

$$V_{y,max} = 4,25 \text{ kN}$$

$$M_{y,max} = 0,47 \text{ kNm}$$

$$M_{z,max} = 10,49 \text{ kNm}$$

#### Únosnost v dvojosém ohybu

$$W_y = 2 \cdot \frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2 = 2 \cdot \frac{1}{6} \cdot 80 \cdot 160^2 = 682667 \text{ mm}^3$$

$$W_z = 2863400 \text{ mm}^3 \text{ (odečteno ze Scia Engineer)}$$

$$f_{m,k} = 24,0 \text{ MPa}$$

$$\gamma_m = 1,3$$

$$k_{mod} = 0,7 \text{ (RD, krátkodobé zatížení, třída provozu 3)}$$

$$k_m = 0,7 \text{ (součinitel vlivu nehomogenit obdélníkového průřezu a redistribuce napětí)}$$

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{m,k}}{\gamma_m} = \frac{0,7 \cdot 24,0}{1,3} = 12,92 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,max}}{W_y} = \frac{0,47 \cdot 10^6}{682667} = 0,69 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_{z,max}}{W_z} = \frac{10,49 \cdot 10^6}{2863400} = 3,66 \text{ MPa}$$

**Posudek MSÚ:**

$$k_M \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} = 0,7 \cdot \frac{0,69}{12,92} + \frac{3,66}{12,92} = 0,32 \leq 1$$

VYHOVUJE

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} + k_M \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} = \frac{0,69}{12,92} + 0,7 \cdot \frac{3,66}{12,92} = 0,25 \leq 1$$

VYHOVUJE

### *Únosnost ve smyku*

$$A = 2 \cdot b \cdot h = 2 \cdot 80 \cdot 160 = 25600 \text{ mm}^2$$

$$f_{v,k} = 2,5 \text{ MPa}$$

$$\gamma_m = 1,3$$

$$k_{mod} = 0,7 \text{ (LLD, krátkodobé zatížení, třída provozu 3)}$$

$$k_{cr} = 0,67 \text{ (součinitel vlivu výsušných trhlin)}$$

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_m} = \frac{0,7 \cdot 2,5}{1,3} = 1,35 \text{ MPa}$$

$$\tau_{v,d} = \frac{1,5 \cdot V_{z,max}}{k_{cr} \cdot A} = \frac{1,5 \cdot 4,25 \cdot 10^3}{0,67 \cdot 25600} = 0,37 \text{ MPa}$$

**Posudek MSÚ:**

$$\tau_{v,d} = 0,37 \text{ MPa} < f_{v,d} = 1,35 \text{ MPa}$$

VYHOVUJE

### *Únosnost v tahu*

$$A = 2 \cdot b \cdot h = 2 \cdot 80 \cdot 160 = 25600 \text{ mm}^2$$

$$f_{t,0,k} = 14,0 \text{ MPa}$$

$$\gamma_m = 1,3$$

$$k_{mod} = 0,7 \text{ (LLD, krátkodobé zatížení, třída provozu 3)}$$

$$f_{t,0,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_m} = \frac{0,7 \cdot 14,0}{1,3} = 7,54 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{max}}{A} = \frac{135,62 \cdot 10^3}{25600} = 5,30 \text{ MPa}$$

### **Posudek MSÚ:**

$$\sigma_{t,0,d} = 5,30 \text{ MPa} < f_{t,0,d} = 7,54 \text{ MPa}$$

VYHOVUJE

### 4.3. Varianta – Příhrada

Třetím konstrukčním systémem, který byl navržen, je prostorová příhradová konstrukce. Jedná se o variantu, kde příhradové nosníky leží pod mostovkou a není nijak omezena minimální průchozí výška 2,5 m.

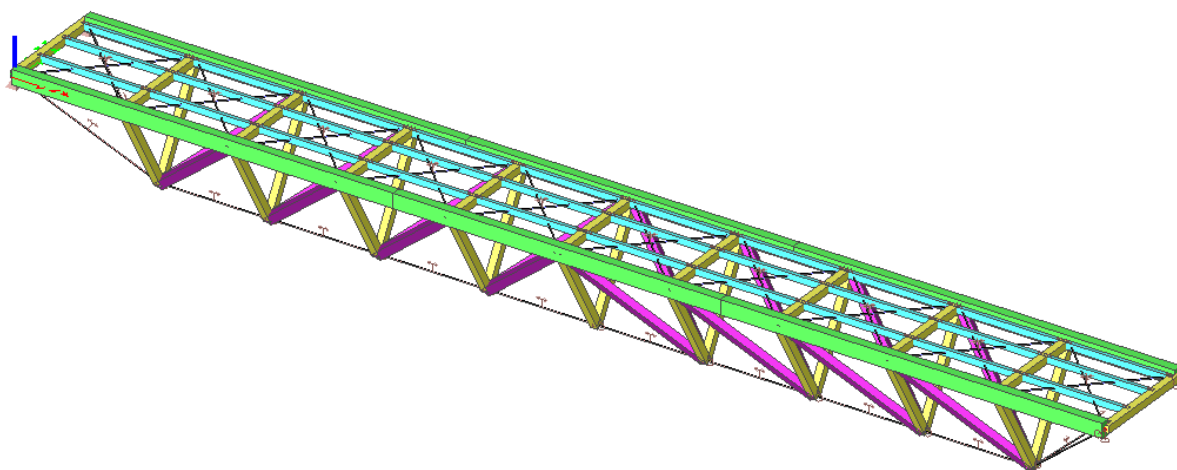
Horní pásy konstrukce byly navrženy z masivního profilu LLD. Ty jsou dále spojeny příčnou vazbou ve tvaru rovnostranného trojúhelníku v modulu 3 m. Dolní pás tvoří pouze táhla firmy Macalloy. Výplňové pruty příhradoviny obstarávají tlačené vzpěry. Ztužení mostovky bylo zajištěno rovněž táhly Macalloy. Podélníky jsou připojeny k příčnícům jako prosté nosníky.

#### Geometrické údaje:

- rozpětí: 30 m
- šířka mostovky: 3 m
- konstrukční výška: 2,8 m

#### Předběžný odhad profilů:

- horní pás: 250/500 mm
- trojúhelníkový příčník: 200/200 mm
- diagonální vzpěry: 200/240 mm
- dolní pás – táhlo:  $\phi$  60 mm



Obrázek 19: Model varianty Příhrada

Konstrukce byla zatížena vlastní tíhou a spojitým zatížením od dopravy  $q_{f,k} = 5 \text{ kN/m}^2$  [6], které bylo rozpočítáno na jednotlivé podélníky s roztečí  $0,89 \text{ m}$ . V programu Scia Engineer byl proveden nelineární výpočet z důvodu vyloučení tlaku v táhlech [14].

#### 4.3.1. Předběžný výpočet - horní pás

$$N_{max} = -439,41 \text{ kN}$$

$$V_{z,max} = 49,62 \text{ kN}$$

$$M_{y,max} = 120,80 \text{ kNm}$$

##### Únosnost v ohybu

$$W_y = \frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2 = \frac{1}{6} \cdot 250 \cdot 500^2 = 1,04 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$$

$$f_{m,k} = 24,0 \text{ MPa}$$

$$\gamma_m = 1,25$$

$$k_{mod} = 0,7 \text{ (LLD, krátkodobé zatížení, třída provozu 3)}$$

$$k_m = 0,7 \text{ (součinitel vlivu nehomogenit obdélníkového průřezu a redistribuce napětí)}$$

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{m,k}}{\gamma_m} = \frac{0,7 \cdot 24,0}{1,25} = 13,44 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{y,max}}{W_y} = \frac{120,8 \cdot 10^6}{1,04 \cdot 10^7} = 11,60 \text{ MPa}$$

##### Posudek MSÚ:

$$\sigma_{m,d} = 11,60 \text{ MPa} < f_{m,d} = 13,44 \text{ MPa}$$

VYHOVUJE

### Únosnost v tlaku

$$A = b \cdot h = 250 \cdot 500 = 125000 \text{ mm}^2$$

$$f_{c,0,k} = 24,0 \text{ MPa}$$

$$\gamma_m = 1,25$$

$$k_{mod} = 0,7 \text{ (LLD, krátkodobé zatížení, třída provozu 3)}$$

$$f_{c,0,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_m} = \frac{0,7 \cdot 24,0}{1,25} = 13,44 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{max}}{A} = \frac{439,41 \cdot 10^3}{125000} = 3,52 \text{ MPa}$$

**Posudek MSÚ:**

$$\sigma_{c,0,d} = 3,52 \text{ MPa} < f_{c,0,d} = 13,44 \text{ MPa}$$

VYHOVUJE

### Únosnost ve smyku

$$A = b \cdot h = 250 \cdot 500 = 125000 \text{ mm}^2$$

$$f_{v,k} = 2,7 \text{ MPa}$$

$$\gamma_m = 1,25$$

$$k_{mod} = 0,7 \text{ (LLD, krátkodobé zatížení, třída provozu 3)}$$

$$k_{cr} = 0,67 \text{ (součinitel vlivu výsušných trhlin)}$$

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_m} = \frac{0,7 \cdot 2,7}{1,25} = 1,51 \text{ MPa}$$

$$\tau_{v,d} = \frac{1,5 \cdot V_{z,max}}{k_{cr} \cdot A} = \frac{1,5 \cdot 49,62 \cdot 10^3}{0,67 \cdot 125000} = 0,89 \text{ MPa}$$

**Posudek MSÚ:**

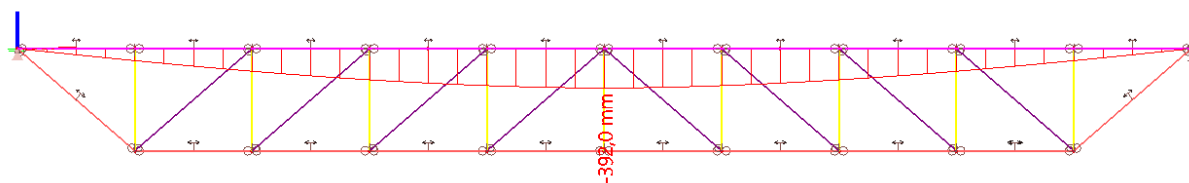
$$\tau_{v,d} = 0,89 \text{ MPa} < f_{v,d} = 1,51 \text{ MPa}$$

VYHOVUJE

### Posudek MSP – horní pás:

- okamžitý průhyb:

$$w_{inst} = 392,0 \text{ mm} > \frac{L}{500} = \frac{30000}{500} = 60,0 \text{ mm} \quad \text{NEVYHOVUJE}$$



Obrázek 20: Průhyb horního pásu

Z posudku MSP jasně vyplývá, že tuhost příhradové konstrukce není dostatečná a při dimenzování by bylo zapotřebí použití neekonomických průřezů. Tento fakt se neshoduje s původním záměrem navrhnout elegantní štíhlou konstrukci, ve které by masivnost použitých prvků byla nežádoucí. Z těchto důvodů nemá smysl uvažovat tuto variantu pro rozpětí 30 m. Tato konstrukční varianta by našla své uplatnění pro kratší rozpětí.

## 4.4. Volba optimální varianty → Oblouk

Původním předpokladem optimální varianty konstrukčního systému byla prostorová příhradovina. Po provedeném výpočtu však bylo zjištěno, že tuhost příhradové konstrukce není na dostatečné úrovni a při dimenzování jednotlivých prvků by bylo zapotřebí neekonomických průřezů. Z tohoto důvodu proběhla volba optimální varianty mezi obloukovou konstrukcí a vřadlem.

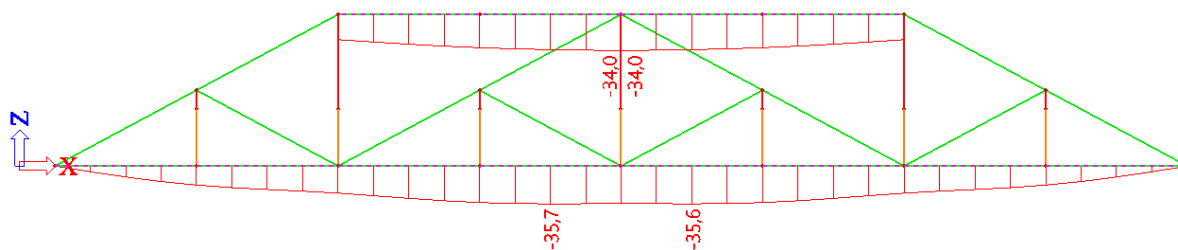
V rámci předběžného odhadu průřezů prvků byla zpracována přibližná spotřeba materiálu zbývajících dvou typů řešení. V porovnání není zahrnuta spotřeba materiálu na spojovací prostředky. Tato tabulka však striktně neurčuje výhodu ani jedné z variant, protože nižší spotřebu dřeva oblouku vyvažuje množství ocelových táhel.



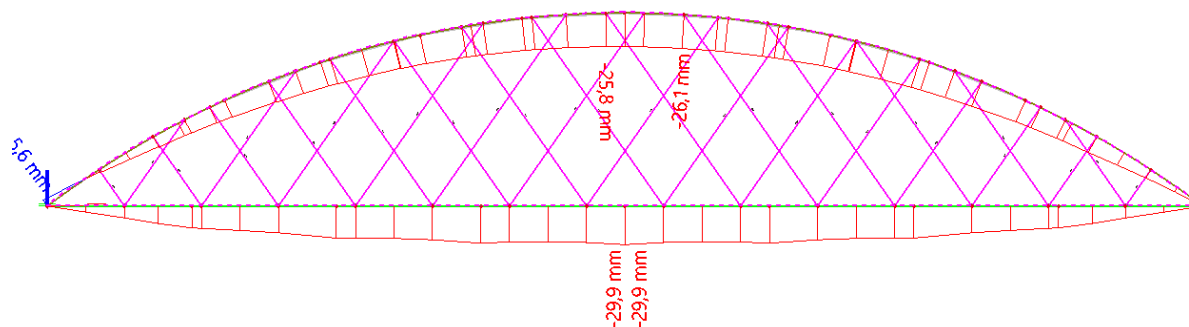
Varianta	objem dřeva	hmotnost oceli
	[m <sup>3</sup> ]	[kg]
Oblouk	17,9	342,9
Věšadlo	23,4	0,0

Tabulka 1: Porovnání spotřeby materiálu

Ovšem z hlediska tuhostí obou konstrukcí se jeví lépe model oblouku. Ověření proběhlo vzájemným srovnáním průhybů – viz obrázky 21, 22.



Obrázek 21: Průhyb věšadla



Obrázek 22: Průhyb oblouku

Pro volbu obloukové konstrukce hovořila i estetická stránka, jako je zapadnutí do rázu krajiny a možnost lepšího výhledu do okolí.

## 5. CHARAKTERISTIKA NAVRŽENÉ KONSTRUKCE

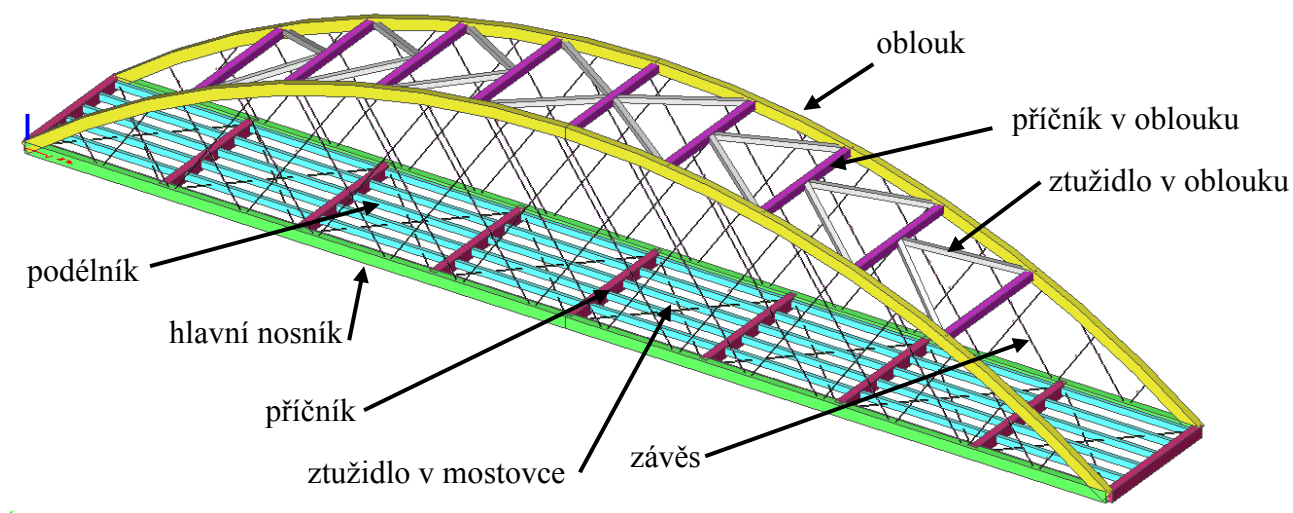
Konstrukce lávky spojuje čtvrť Staré Město v Karviné se starou hornickou kolonií Sovinec. Zde konstrukce překonává nejužší část řeky Olše v okolí, která činí přibližně 20 m.



Obrázek 23: Umístění lávky [22]

Na obrázku 24 je označeno pojmenování jednotlivých posuzovaných prvků, posuzované spoje jsou řešeny v kapitole 7. Dále jsou uvedeny jednotlivé kroky výpočtu zatížení působícího na konstrukci a jejich kombinace. Na konci kapitoly je popsán výpočtový model lávky, který byl vytvořen v programu Scia Engineer 14 [14].

Podrobnější popis nosné konstrukce byl již zpracován dříve v kapitole 4.1.



Obrázek 24: Pojmenování řešených prvků

## 5.1. Základní geometrické údaje

Rozpětí:	30 m
Vzepětí:	5 m
Průchozí výška:	2,7 m
Průchozí šířka:	3,47 m
Osová vzdálenost hlavních nosníků:	3,75 m
Osová vzdálenost příčniců:	3,75 m
Osová vzdálenost podélníků:	0,7 m
Výška lávky nad terénem:	6 m

## 5.2. Materiálové charakteristiky

V projektu byly využity fošny (jako mostiny) z rostlého smrkového dřeva třídy pevnosti C24 [10]. Všechny ostatní nosné prvky byly navrženy z lepeného lamelové dřeva třídy pevnosti GL24h [11]. Plechy, navržené ve spojích ocel – dřevo, byly navrženy z oceli S355. Materiál spojovacích prostředků kolíkového typu je vždy uveden při výpočtu příslušného spoje.

<b>Pevnosti</b>		<b>C24</b> [MPa]	<b>GL24 h</b> [MPa]
Ohyb	$f_{m,k}$	24,0	24,0
Tah rovnoběžně s vlákny	$f_{t,0,k}$	14,0	16,5
Tah kolmo k vláknům	$f_{t,90,k}$	0,5	0,4
Tlak rovnoběžně s vlákny	$f_{c,0,k}$	21,0	24,0
Tlak kolmo k vláknům	$f_{c,90,k}$	2,5	2,7
Smyk	$f_{v,k}$	2,5	2,7
<b>Tuhosti</b>		<b>[GPa]</b>	<b>[GPa]</b>
Průměrná hodnota modulu pružnosti s vlákny	$E_{0,mean}$	11,0	11,6
5% kvantil modulu pružnosti s vlákny	$E_{0,05}$	7,4	9,4
Průměrná hodnota modulu pružnosti ⊥ k vláknům	$E_{90,mean}$	0,37	0,39
Průměrná hodnota modulu pružnosti ve smyku	$G_{mean}$	0,69	0,72
<b>Hustota</b>		<b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>
Hustota	$\rho_k$	350	380
Průměrná hodnota hustoty	$\rho_{mean}$	420	

Tabulka 2: Charakteristické hodnoty pevnosti a tuhosti použitého dřeva [10],[11]

### 5.3. Výpočet zatížení

Na konstrukci působí zatížení stálé [2], užitné od dopravy [6], sníh [3], vítr [4] a teplota [5]. Stálým zatížením lávky je vlastní tíha nosných prvků, mostiny a zábradlí. Užitné zatížení je uvažováno od dopravy, tedy davem chodců. Obslužné vozidlo ve výpočtu nebylo bráno v úvahu, protože je zabráněno jeho vjezdu na konstrukci dřevěným sloupkem. Objekt je situován v Karviné, takže zde platí podmínky pro sněhovou i větrovou oblast II. Prvky závěsy (Macalloy S460) byly zatíženy konstantní změnou teploty.

### 5.3.1. Stálé zatížení

Vlastní tíha nosných prvků byla vygenerována softwarem Scia Engineer 14 [14].

Ostatní stálé	$\gamma$ [kg/m <sup>3</sup> ]	tloušťka [mm]	$g_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	zat. šířka [mm]	$g_k$ [kN/m]
zábradlí - krajní podélník					0,50
mostiny - krajní podélník	420	50	0,21	350	0,07
mostiny - vnitřní podélník	420	50	0,21	700	0,14

Tabulka 3: Výpočet ostatního stálého zatížení

### 5.3.2. Zatížení od dopravy

Doporučená hodnota zatížení davem chodců na lávkách je  $q_{f,k} = 5 \text{ kN/m}^2$ . Vynásobením zatěžovací šířkou bylo získáno výsledné svislé spojitě zatížení na podélník. Vodorovná složka zatížení odpovídá 10 % hodnoty výsledného svislého zatížení [6].

Doprava - chodci svislé	$q_{f,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	zat. šířka [mm]	$q_{f,k}$ [kN/m]
krajní podélník	5	350	1,73
vnitřní podélník	5	700	3,45

Tabulka 4: Svislá složka zatížení od dopravy

Doprava - chodci vodorovné	$q_{f,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	zat. šířka [mm]	$q_{f,k}$ [kN/m]
krajní podélník	0,5	345	0,17
vnitřní podélník	0,5	690	0,35

Tabulka 5: Vodorovná složka zatížení od dopravy

### 5.3.3. Sníh

Zatížení na mostovku lávky bylo uvažováno jako charakteristická hodnota zatížení sněhem na zemi [15].

Sníh	$s_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	zat. šířka [mm]	$s_k$ [kN/m]
krajní podélník	0,9	345	0,31
vnitřní podélník	0,9	690	0,62

Tabulka 6: Výpočet zatížení sněhem

### 5.3.4. Vítr

Počítáno dle kapitol 4 *Rychlost větru a dynamický tlak*, 7.6 *Nosné prvky s obdélníkovými průřezy*, 7.9 *Kruhové válce* a 8 *Zatížení mostů větrem* z normy [4]. Větrná oblast pro výpočet tohoto zatížení je kategorie II. Nejprve byl vypočítán charakteristický maximální dynamický tlak  $q_p$  a následně byly určeny výsledné tlaky větru na jednotlivé prvky konstrukce.

#### **Maximální dynamický tlak**

$$v_{b,0} = 25 \text{ m/s}$$

$$c_{dir} = 1$$

$$c_{season} = 1$$

$$v_b = v_{b,0} \cdot c_{dir} \cdot c_{season} = 25 \cdot 1 \cdot 1 = 25 \text{ m/s}$$

$$h = 6 \text{ m}$$

$$z = z_e = z_i = h = 6 \text{ m}$$

$$z_0 = 0,05 \text{ m (kategorie terénu II)}$$

$$z_{min} = 2 \text{ m (kategorie terénu II)}$$

$$z_{0,II} = 0,05$$

$$k_r = 0,19 \cdot \left( \frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} = 0,19 \cdot \left( \frac{0,05}{0,05} \right)^{0,07} = 0,19$$

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) = 0,19 \cdot \ln \frac{6}{0,05} = 0,91$$

$$c_0(z) = 1$$

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b = 0,91 \cdot 1 \cdot 25 = 22,74 \text{ m/s}$$

$$I_v(z) = \frac{k_I}{c_0(z) \cdot \ln \frac{z}{z_0}} = \frac{1}{1 \cdot \ln \frac{6}{0,05}} = 0,209$$

$$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$$

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2 = [1 + 7 \cdot 0,209] \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 22,74^2 = 0,80 \text{ kN/m}^2$$

### **Vodorovný vítr ve směru x**

Vodorovné zatížení působící na obloukový nosník bylo určeno podle kapitoly 7.6 *Nosné prvky s obdélníkovými průřezy* [4].

$$d = 280 \text{ mm}$$

$$b = 600 \text{ mm}$$

$$d/b = 0,47 \Rightarrow c_f = 2,24 \text{ (součinitel síly pro obdélníkové průřezy s ostrými hranami)}$$

$$c_s c_d = 1 \text{ (součinitel konstrukce)}$$

$$w_{k,x,oblouk} = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z) \cdot h_{oblouku} = 1 \cdot 2,24 \cdot 0,80 \cdot 0,6 = 1,07 \text{ kN/m}$$

Vodorovné zatížení působící na hlavní nosník bylo určeno podle kapitoly 8 *Zatížení mostů větrem* [4].

$$b = 3,75 + 0,28 = 4,03 \text{ m (osová vzdálenost hl. nosníků + 1 šířka hl. nosníku)}$$



$$d_{tot} = 0,6 + 0,6 = 1,2 \text{ m}$$

$$b/d_{tot} = 4,03/1,2 = 3,36 \Rightarrow c_{f,x} = 1,5 \text{ (součinitel síly)}$$

$$w_{k,x,hl. \text{ nosník}} = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z) \cdot h_{hl. \text{ nosník}} = 1 \cdot 1,5 \cdot 0,80 \cdot 0,6 = 0,72 \text{ kN/m}$$

Vodorovné zatížení působící na závěsy bylo určeno podle kapitoly 7.9 *Kruhové válce* [4].

$$c_f = 1,4 \text{ (nejnepříznivější hodnota z tabulky 7.28 [10])}$$

$$w_{k,x,závěs} = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z) \cdot \phi_{táhla} = 1 \cdot 1,4 \cdot 0,80 \cdot 0,015 = 0,017 \text{ kN/m}$$

### Svislý vítr ve směru z

Svislý vítr působící na mostovku byl rozpočítán na hlavní nosníky, krajní a vnitřní podélníky. Pro součinitel síly byly uvažovány doporučené hodnoty  $c_f = \pm 0,9$ .

Vítr svislý	$q_{f,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	zat. šířka [mm]	$c_s c_d$	$c_f$ +/-	$w_{k+}$ [kN/m]	$w_{k-}$ [kN/m]
krajní podélník	0,80	345	1	0,9	0,25	-0,25
vnitřní podélník	0,80	690	1	0,9	0,49	-0,49
hlavní nosník	0,80	300	1	0,9	0,21	-0,21

Tabulka 7: Výpočet svislého větru

### 5.3.5. Teplota

Zatížení teplotou se se týkalo pouze prvků závěsů, které byly navrženy jako táhla Macalloy S460. Výpočet byl proveden podle kapitoly 6 *Teplotní změny u mostů* dle [5]. Závěsy byly zařazeny do 1. typu: ocelové nosné konstrukce.

$$T_{e,max} = T_{max} + 16^{\circ}C = 38 + 16 = 54^{\circ}C$$

$$T_{e,min} = T_{min} - 3^{\circ}C = -36 - 3 = -39^{\circ}C$$

$$\Delta T_{N,con} = T_0 - T_{e,min} = 10 - (-39) = 49^{\circ}C$$

$$\Delta T_{N,exp} = T_{e,max} - T_0 = 54 - 10 = 44^{\circ}C$$

## 5.4. Kombinace zatížení

Bylo vytvořeno 12 zatěžovacích stavů, které byly kombinovány podle normy [1]. Podle informací uvedených v normě se nemusí kombinovat zatížení větrem s teplotou a dále zatížení sněhem s dopravou. V programu Scia Engineer bylo vygenerováno 142 nelineárních kombinací pro posouzení na MSÚ a 71 nelineárních kombinací pro posouzení na MSP.

Kombinační vzorec pro MSÚ:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

Kombinační vzorec pro MSP:

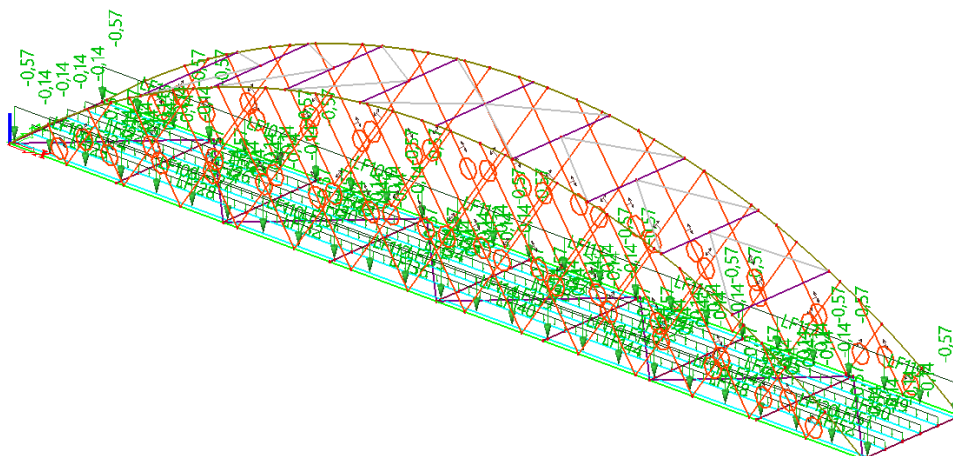
$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

### *Zatěžovací stavy*

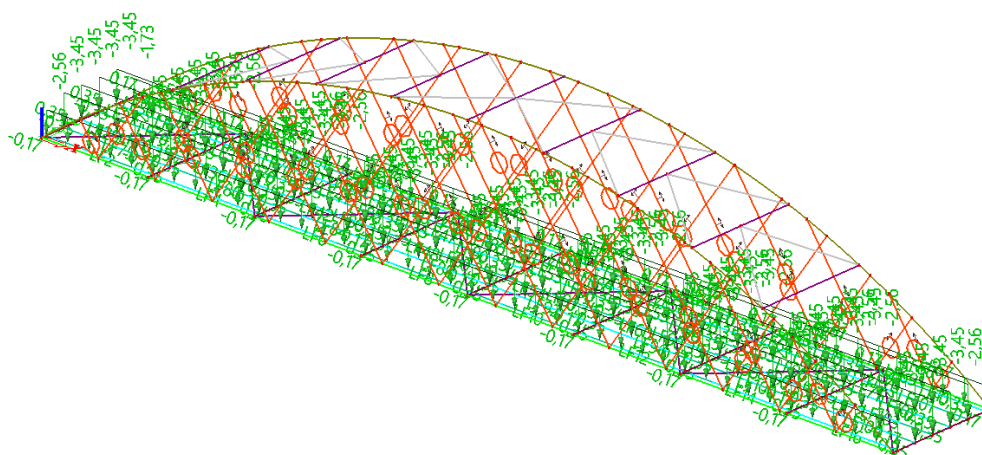
**LC1 – vlastní tíha** byl vygenerován programem Scia Engineer.

**LC10 – vítr svisle nahoru** byl zadán stejně jako LC9 s opačným znaménkem.

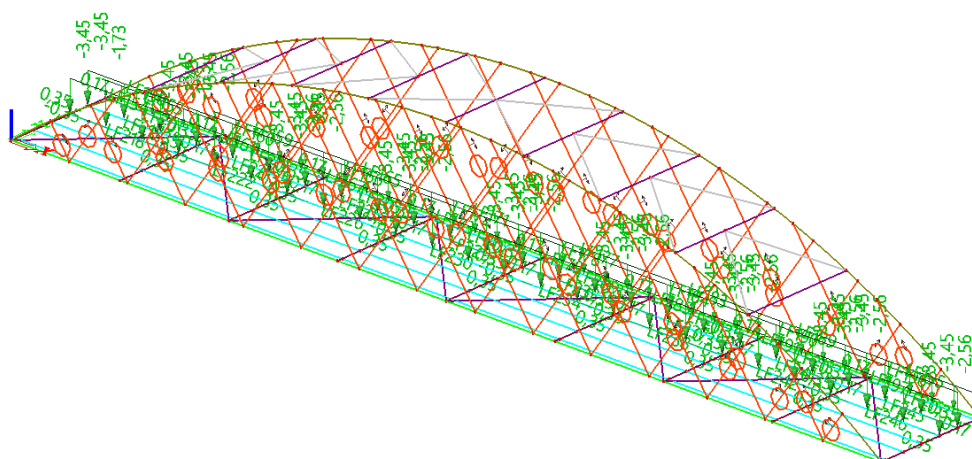
**LC12 – teplota smrštění** byl zadán stejně jako LC11 s příslušnou hodnotou  $\Delta T_{N,con}$ .



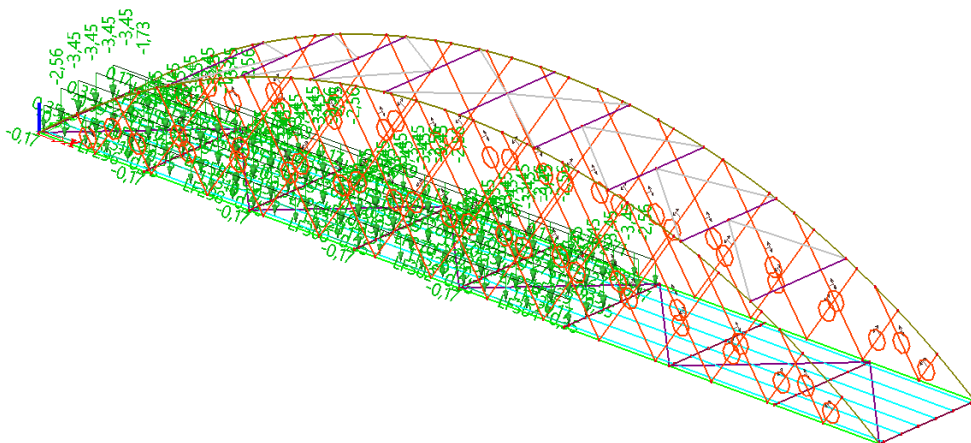
Obrázek 25: LC2 - stálé



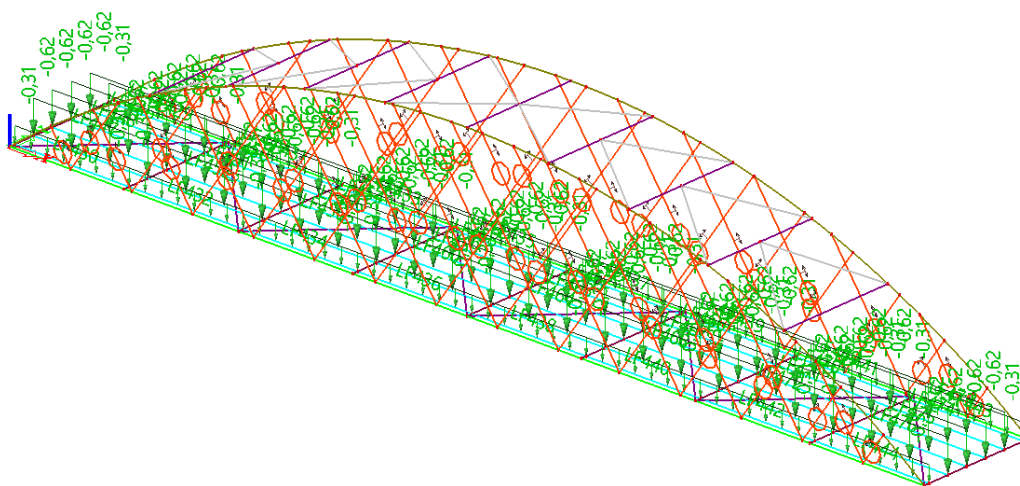
Obrázek 26: LC3 - chodci na celém mostě



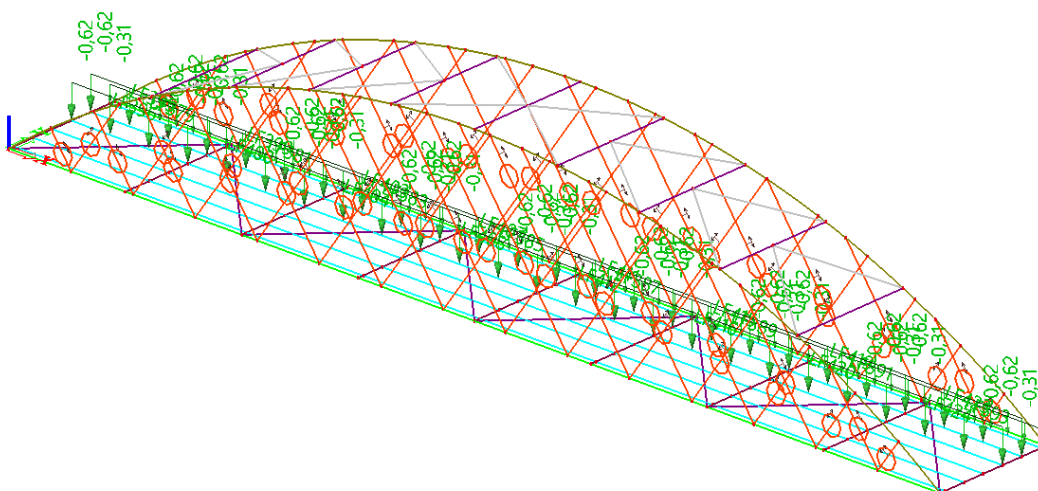
Obrázek 27: LC4 - chodci na 1/2 příčně



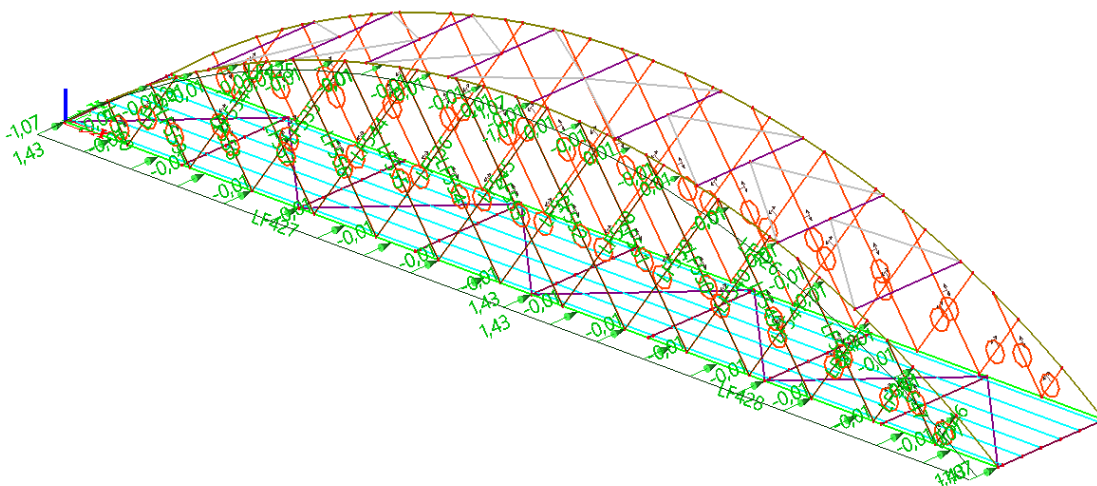
Obrázek 28: LC5 - chodci na 5/8 podélně



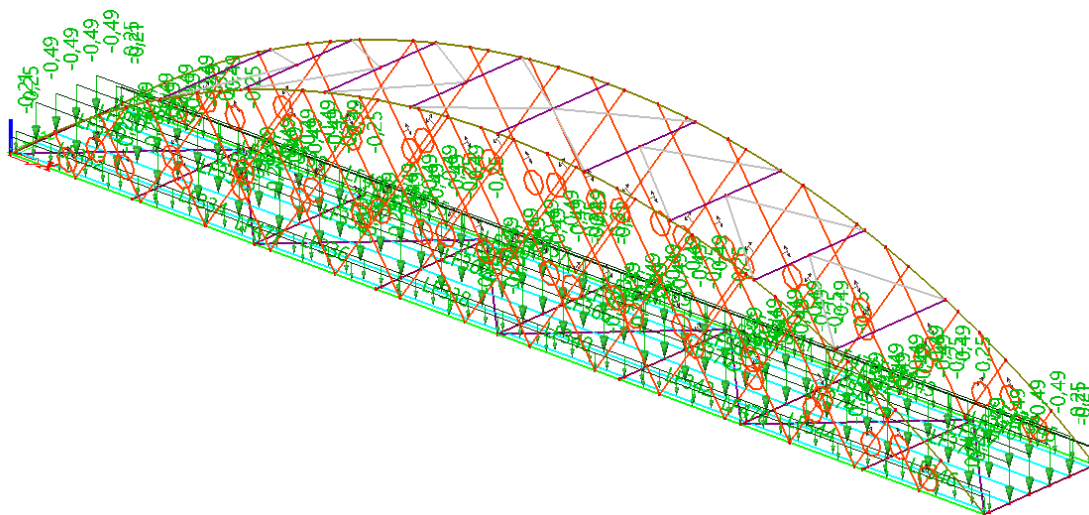
Obrázek 29: LC6 - sníh na celém mostě



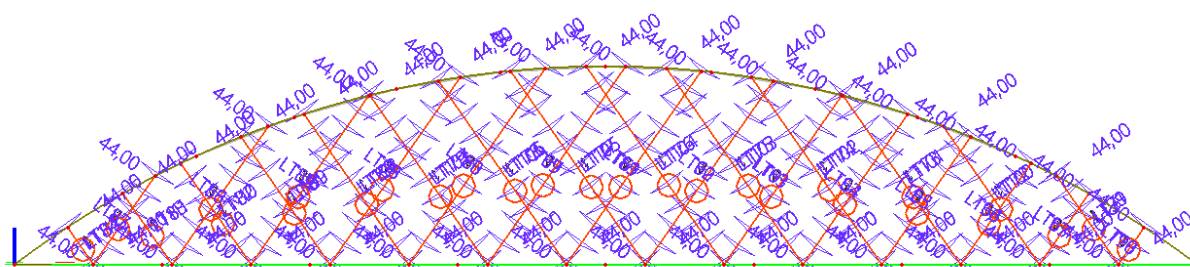
Obrázek 30: LC7 - sníh na 5/8 podélně



Obrázek 31: LC8 - vítr z boku



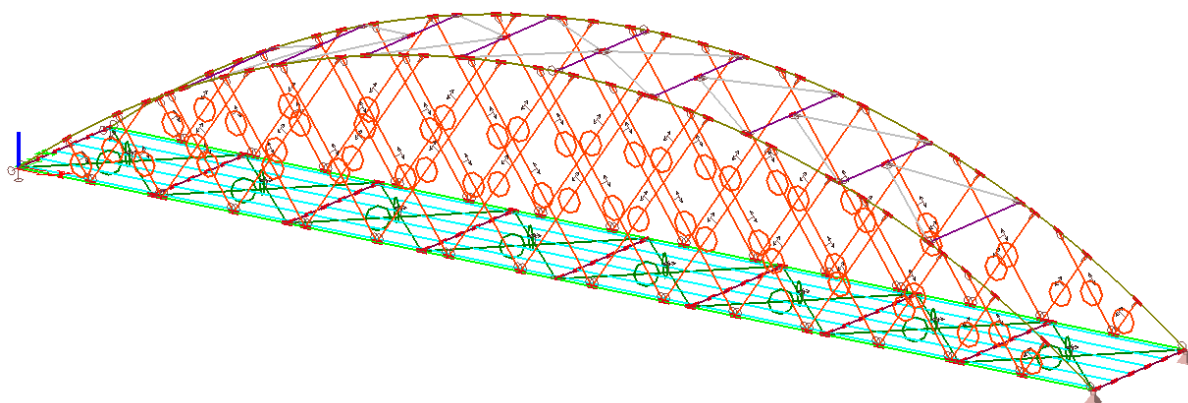
Obrázek 32: LC9 - vítr svisle dolů



Obrázek 33: LC11 - Teplota protažení

## 5.5. Výpočetní model

Pro výpočet vnitřních sil a deformací byl vytvořen prostorový model lávky v programu Scia Engineer [14]. Tento model se skládal ze 154 prutů propojujících 181 uzlů. Typ konstrukce – obecná XYZ s využitím funkcionalit nelinearity, dynamiky a návrhu mostů. V rámci lokálních nelinearit prutů byl vyloučen tlak v táhlech, tedy v prvcích závěsů a ztužidel v mostovce. Ve stejných prvcích byl změněn FEM typ na pouze osově síly, tak aby táhla nebyla namáhána ohybovými momenty a byla zachována jejich vlastní tíha pro výpočet zatížení. Konstrukce je na jedné straně podepřena dvěma pevnými kloubovými podpěrami a na druhém konci dvěma posuvnými (ve směru  $x$ ) kloubovými podpěrami. Funkcionalita návrhu mostů byla využita pro vygenerování kombinací zatěžovacích stavů pro posouzení na MSÚ a MSP. Byl proveden nelineární výpočet pomocí metody Newton – Raphson.



Obrázek 34: Výpočtový model

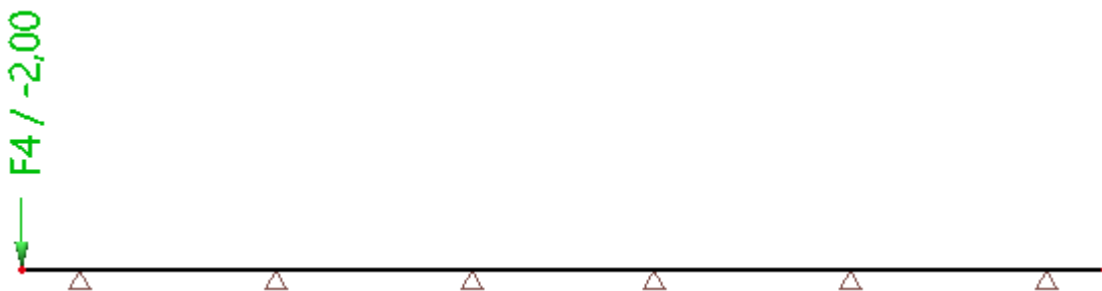


## 6. NÁVRH A POSUDEK NOSNÝCH PRVKŮ

Pro posouzení jednotlivých dřevěných prvků bylo postupováno dle normy ČSN EN 1995-1-1 [8]. Prvky ocelových táhel byly navrhovány podle materiálů firmy Macalloy [16]. Všechny prvky konstrukce lávky byly posuzovány pro třídu provozu 3, takže  $k_{def} = 2,0$  a  $\gamma_M = 1,25$  (pro GL24h) resp.  $\gamma_M = 1,3$  (pro C24). Obalové křivky vnitřních sil a deformací jsou uvedeny v přílohách 1 - 9.

### 6.1. Mostiny

Mostiny byly navrženy z dřevěných fošen průřezu  $200 \times 50 \text{ mm}$  třídy pevnosti C24. Připoj mostin k podélníkům byl navržen konstrukčně pomocí vrutů  $2 \times \phi = 6 \text{ mm}$  ke každému podélníku. Mezi mostiny a podélníky byla umístěna hydroizolace. Statickým schématem byl spojitý nosník o 5 polích délky  $680 \text{ mm}$  s převislými konci délky  $200 \text{ mm}$ . Zatížení mostin bylo provedeno pomocí osamělého břemena  $2 \text{ kN}$ .



Obrázek 35: Statické schéma mostin s nejnepříznivějším zatížením

#### Průřezové charakteristiky

$$b = 200 \text{ mm}$$

$$h = 50 \text{ mm}$$

$$A = b \cdot h = 200 \cdot 50 = 10000 \text{ mm}^2$$



$$W_y = \frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2 = \frac{1}{6} \cdot 200 \cdot 50^2 = 83333 \text{ mm}^3$$

### **Materiálové charakteristiky**

$$f_{m,k} = 24,0 \text{ MPa}$$

$$f_{v,k} = 2,5 \text{ MPa}$$

$$\gamma_M = 1,3$$

$$k_{mod} = 0,7 \text{ (RD, krátkodobé zatížení)}$$

$$k_{def} = 2,0 \text{ (součinitel zvětšování deformací následkem dotvarování)}$$

$$k_{cr} = 0,67 \text{ (součinitel vlivu výsušných trhlin)}$$

### **Posudek MSÚ v ohybu**

$$M_{Ed} = 0,40 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{Ed}}{W_y} = \frac{0,40 \cdot 10^6}{83333} = 4,80 \text{ MPa}$$

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{m,k}}{\gamma_M} = \frac{0,7 \cdot 24,0}{1,3} = 12,92 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,d} = 4,80 \text{ MPa} < f_{m,d} = 12,92 \text{ MPa}$$

VYHOVUJE

### **Posudek MSÚ ve smyku**

$$V_{Ed} = 2,01 \text{ kN}$$

$$\tau_{v,d} = \frac{1,5 \cdot V_{Ed}}{k_{cr} \cdot A} = \frac{1,5 \cdot 2,01 \cdot 10^3}{0,67 \cdot 10000} = 0,45 \text{ MPa}$$

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_M} = \frac{0,7 \cdot 2,5}{1,3} = 1,35 \text{ MPa}$$

$$\tau_{v,d} = 0,45 \text{ MPa} < f_{v,d} = 1,35 \text{ MPa}$$

VYHOVUJE

### Posudek MSP

- okamžitý průhyb:

$$w_{inst} = 0,5 \text{ mm} < \frac{L}{500} = \frac{680}{500} = 1,4 \text{ mm} \quad \text{VYHOVUJE}$$

- konečný průhyb:

$$w_{fin} = (1 + k_{def}) \cdot w_{inst} = (1 + 2) \cdot 0,5 = 1,5 \text{ mm}$$

$$w_{fin} = 1,5 \text{ mm} < \frac{L}{250} = \frac{680}{250} = 2,7 \text{ mm} \quad \text{VYHOVUJE}$$

## 6.2. Oblouk

Obloukový nosník byl navržen z LLD průřezu  $280 \times 600 \text{ mm}$  třídy pevnosti GL24h. Ze statického hlediska se jedná o trojkloubový oblouk, kde kloub ve vrcholu oblouku je zajištěn čepovým spojem. Oblouk je podepřen jako prostý nosník pomocí pevných a posuvných čepů. Vzpěrná délka v rovině oblouku byla uvažována jako  $1,25 \times$  polovina délky oblouku (teorie I. řádu) a vzpěrná délka z roviny oblouku je dána nejdelší částí nosníku mezi příčným ztužidlem a podporou. Posudek byl proveden na smyk a na kombinaci dvojosého ohybu se vzpěrným tlakem.

### Průřezové charakteristiky

$$b = 280 \text{ mm}$$

$$h = 600 \text{ mm}$$

$$A = b \cdot h = 280 \cdot 600 = 1,68 \cdot 10^5 \text{ mm}^2$$

$$W_y = \frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2 = \frac{1}{6} \cdot 280 \cdot 600^2 = 1,68 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$$

$$W_z = \frac{1}{6} \cdot h \cdot b^2 = \frac{1}{6} \cdot 600 \cdot 280^2 = 7,84 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

$$I_y = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 = \frac{1}{12} \cdot 280 \cdot 600^3 = 5,04 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

$$I_z = \frac{1}{12} \cdot h \cdot b^3 = \frac{1}{12} \cdot 600 \cdot 280^3 = 1,10 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{5,04 \cdot 10^9}{1,68 \cdot 10^5}} = 173,21 \text{ mm}$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = \sqrt{\frac{1,10 \cdot 10^9}{1,68 \cdot 10^5}} = 80,83 \text{ mm}$$

### Materiálové charakteristiky

$$f_{m,k} = 24,0 \text{ MPa}$$

$$f_{c,0,k} = 24,0 \text{ MPa}$$

$$f_{v,k} = 2,7 \text{ MPa}$$

$$\gamma_M = 1,25$$

$$k_{mod} = 0,7 \text{ (LLD, krátkodobé zatížení)}$$

$$k_{def} = 2,0 \text{ (součinitel zvětšování deformací následkem dotvarování)}$$

$$k_m = 0,7 \text{ (součinitel vlivu nehomogenit a redistribuce napětí)}$$

$$k_{cr} = 0,67 \text{ (součinitel vlivu výsušných trhlin)}$$

### Vnitřní síly

extrém	NC
$N_{Ed} = -415,34 \text{ kN}$	9
$V_{y,Ed} = 17,91 \text{ kN}$	44
$V_{z,Ed} = 19,81 \text{ kN}$	30
$M_{y,Ed} = 35,81 \text{ kNm}$	32
$M_{z,Ed} = 41,20 \text{ kNm}$	40

Tabulka 8: Extrémy vnitřních sil v oblouku

### Posudek MSÚ na kombinaci dvojosého ohybu a vzpěrného tlaku

Rozhodující kombinace zatížení:

$$NC40 (1,35 \cdot LC1 + 1,35 \cdot LC2 + 0,54 \cdot LC3 + 1,5 \cdot LC8)$$

$$M_{z,Ed} = 41,20 \text{ kNm}$$

$$M_{y,přísl.} = 4,95 \text{ kNm}$$

$$N_{přísl.} = -249,75 \text{ kN}$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_{z,Ed}}{W_z} = \frac{41,20 \cdot 10^6}{7,84 \cdot 10^6} = 5,26 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,přísl.}}{W_y} = \frac{4,95 \cdot 10^6}{1,68 \cdot 10^7} = 0,29 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{přísl.}}{A} = \frac{249,75 \cdot 10^3}{1,68 \cdot 10^5} = 1,49 \text{ MPa}$$

Součinitel vzpěrnosti:

$$L = 32175 \text{ mm (délka oblouku)}$$

$$L_{cr,y} = 1,25 \cdot \frac{L}{2} = 1,25 \cdot \frac{32175}{2} = 20109 \text{ mm (vzpěrná délka v rovině oblouku)}$$

$$L_{cr,z} = 5462 \text{ mm (vzpěrná délka z roviny oblouku)}$$

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{20109}{173,21} = 116,10$$

$$\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{5462}{80,83} = 66,35$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{116,10}{\pi} \sqrt{\frac{24,0}{9400}} = 1,87$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{66,35}{\pi} \sqrt{\frac{24,0}{9400}} = 1,07$$

$$\beta_c = 0,1 \text{ (pro LLD)}$$

$$k_y = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2)$$

$$k_y = 0,5 \cdot (1 + 0,1 \cdot (1,87 - 0,3) + 1,87^2) = 2,32$$

$$k_z = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2)$$

$$k_z = 0,5 \cdot (1 + 0,1 \cdot (1,07 - 0,3) + 1,07^2) = 1,11$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{2,32 + \sqrt{2,32^2 - 1,87^2}} = 0,27$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{1,11 + \sqrt{1,11^2 - 1,07^2}} = 0,71$$

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{m,k}}{\gamma_M} = \frac{0,7 \cdot 24,0}{1,25} = 13,44 \text{ MPa}$$

$$f_{c,0,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_M} = \frac{0,7 \cdot 24,0}{1,25} = 13,44 \text{ MPa}$$

**Posudek:**

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1$$

$$\frac{0,29}{13,44} + 0,7 \cdot \frac{5,26}{13,44} + \frac{1,49}{0,27 \cdot 13,44} = 0,71 \leq 1$$

VYHOVUJE

$$k_M \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1$$

$$0,7 \cdot \frac{0,29}{13,44} + \frac{5,26}{13,44} + \frac{1,49}{0,71 \cdot 13,44} = 0,56 \leq 1$$

VYHOVUJE

**Posudek MSÚ ve smyku**

$$V_{Ed} = 19,81 \text{ kN}$$

$$\tau_{v,d} = \frac{1,5 \cdot V_{Ed}}{k_{cr} \cdot A} = \frac{1,5 \cdot 19,81 \cdot 10^3}{0,67 \cdot 1,68 \cdot 10^5} = 0,26 \text{ MPa}$$

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_M} = \frac{0,7 \cdot 2,7}{1,25} = 1,51 \text{ MPa}$$

$$\tau_{v,d} = 0,26 \text{ MPa} < f_{v,d} = 1,51 \text{ MPa}$$

VYHOVUJE

### Posudek MSP

Rozhodující kombinace zatížení pro svislý průhyb:

NC156 (1,0 · LC1 + 1,0 · LC2 + 1,0 · LC5 + 0,3 · LC8)

- okamžitý průhyb:

$$w_{inst} = 11,7 \text{ mm} < \frac{L}{500} = \frac{30000}{500} = 60,0 \text{ mm}$$

VYHOVUJE

- konečný průhyb:

$$w_{fin} = (1 + k_{def}) \cdot w_{inst} = (1 + 2) \cdot 11,7 = 35,1 \text{ mm}$$

$$w_{fin} = 35,1 \text{ mm} < \frac{L}{250} = \frac{30000}{250} = 120,0 \text{ mm}$$

VYHOVUJE

Rozhodující kombinace zatížení pro vodorovný průhyb:

NC170 (1,0 · LC1 + 1,0 · LC2 + 0,4 · LC4 + 1,0 · LC8)

- okamžitý průhyb:

$$u_{inst} = 30,1 \text{ mm} < \frac{L}{500} = \frac{30000}{500} = 60,0 \text{ mm}$$

VYHOVUJE

- konečný průhyb:

$$u_{fin} = (1 + k_{def}) \cdot u_{inst} = (1 + 2) \cdot 30,1 = 90,3 \text{ mm}$$

$$u_{fin} = 90,3 \text{ mm} < \frac{L}{250} = \frac{30000}{250} = 120,0 \text{ mm}$$

VYHOVUJE

### 6.3. Hlavní nosník

Hlavní nosník byl navržen stejně jako oblouk z LLD průřezu  $280 \times 600 \text{ mm}$  třídy pevnosti GL24h. Nosič se skládá ze tří montážních celků ( $9 \text{ m} + 12 \text{ m} + 9 \text{ m}$ ), které jsou spojeny tuhým montážním spojem. Celková délka hlavního nosníku tedy činí  $30 \text{ m}$ . Prvek je namáhán zejména tahem, proto byl proveden posudek na kombinaci tahu s dvojosým ohybem a dále posudek na smyk.

#### Průřezové charakteristiky

$$b = 280 \text{ mm}$$

$$h = 600 \text{ mm}$$

$$A = b \cdot h = 280 \cdot 600 = 1,68 \cdot 10^5 \text{ mm}^2$$

$$W_y = \frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2 = \frac{1}{6} \cdot 280 \cdot 600^2 = 1,68 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$$

$$W_z = \frac{1}{6} \cdot h \cdot b^2 = \frac{1}{6} \cdot 600 \cdot 280^2 = 7,84 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

#### Materiálové charakteristiky

$$f_{m,k} = 24,0 \text{ MPa}$$

$$f_{t,0,k} = 16,5 \text{ MPa}$$

$$f_{v,k} = 2,7 \text{ MPa}$$

$$\gamma_M = 1,25$$

$$k_{mod} = 0,7 \text{ (LLD, krátkodobé zatížení)}$$

$$k_{def} = 2,0 \text{ (součinitel zvětšování deformací následkem dotvarování)}$$

$$k_m = 0,7 \text{ (součinitel vlivu nehomogenit a redistribuce napětí)}$$

$$k_{cr} = 0,67 \text{ (součinitel vlivu výsušných trhlin)}$$



## Vnitřní síly

extrém	NC
$N_{Ed} = 315,61 \text{ kN}$	10
$V_{y,Ed} = 11,30 \text{ kN}$	45
$V_{z,Ed} = 43,36 \text{ kN}$	9
$M_{y,Ed} = 45,42 \text{ kNm}$	108
$M_{z,Ed} = 27,05 \text{ kNm}$	40

Tabulka 9: Extrémy vnitřních sil hlavního nosníku

### Posudek MSÚ na kombinaci dvojosého ohybu a tahu

Rozhodující kombinace zatížení:

NC40 (1,35 · LC1 + 1,35 · LC2 + 0,54 · LC3 + 1,5 · LC8)

$$M_{z,Ed} = 27,05 \text{ kNm}$$

$$M_{y,přísl.} = 3,34 \text{ kNm}$$

$$N_{přísl.} = 143,84 \text{ kN}$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_{z,Ed}}{W_z} = \frac{27,05 \cdot 10^6}{7,84 \cdot 10^6} = 3,45 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,přísl.}}{W_y} = \frac{3,34 \cdot 10^6}{1,68 \cdot 10^7} = 0,20 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{přísl.}}{A} = \frac{143,84 \cdot 10^3}{1,68 \cdot 10^5} = 0,86 \text{ MPa}$$

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{m,k}}{\gamma_M} = \frac{0,7 \cdot 24,0}{1,25} = 13,44 \text{ MPa}$$

$$f_{t,0,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_M} = \frac{0,7 \cdot 16,5}{1,25} = 9,24 \text{ MPa}$$

**Posudek:**

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{t,0,d}} \leq 1$$

$$\frac{0,20}{13,44} + 0,7 \cdot \frac{3,45}{13,44} + \frac{0,86}{9,24} = 0,29 \leq 1$$

VYHOVUJE

$$k_M \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{t,0,d}} \leq 1$$

$$0,7 \cdot \frac{0,20}{13,44} + \frac{3,45}{13,44} + \frac{0,86}{9,24} = 0,36 \leq 1$$

VYHOVUJE

**Posudek MSÚ ve smyku**

$$V_{Ed} = 43,36 \text{ kN}$$

$$\tau_{v,d} = \frac{1,5 \cdot V_{Ed}}{k_{cr} \cdot A} = \frac{1,5 \cdot 43,36 \cdot 10^3}{0,67 \cdot 1,68 \cdot 10^5} = 0,58 \text{ MPa}$$

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_M} = \frac{0,7 \cdot 2,7}{1,25} = 1,51 \text{ MPa}$$

$$\tau_{v,d} = 0,58 \text{ MPa} < f_{v,d} = 1,51 \text{ MPa}$$

VYHOVUJE

**Posudek MSP**

Rozhodující kombinace zatížení:

$$NC195 (1,0 \cdot LC1 + 1,0 \cdot LC2 + 1,0 \cdot LC5 + 0,6 \cdot LC11)$$

- okamžitý průhyb:

$$w_{inst} = 15,7 \text{ mm} < \frac{L}{500} = \frac{30000}{500} = 60,0 \text{ mm}$$

VYHOVUJE

- konečný průhyb:

$$w_{fin} = (1 + k_{def}) \cdot w_{inst} = (1 + 2) \cdot 15,7 = 47,1 \text{ mm}$$

$$w_{fin} = 47,1 \text{ mm} < \frac{L}{250} = \frac{30000}{250} = 120,0 \text{ mm}$$

VYHOVUJE

## 6.4. Závěsy

Propojení jednoho oblouku s hlavním nosníkem zajišťuje 28 kloubově připojených šikmých závěsů. Tyto prvky jsou odkloněny od svislice o  $35^\circ$  a tím příznivěji roznášejí ohybový moment v oblouku. Vzdálenost mezi rovnoběžnými závěsy činí  $2\text{ m}$ . Při dimenzování byly využity materiály firmy Macalloy [16]. Byla navržena táhla z nerezové oceli S460 o  $\phi 15\text{ mm}$ . Tyče jsou standardně dodávány do délky  $7,5\text{ m}$  pro všechny průměry, nejdelší navržené táhlo má délku  $l = 6,01\text{ m}$ .


Rozhodující kombinace zatížení:

$$NC9 (1,35 \cdot LC1 + 1,35 \cdot LC2 + 1,35 \cdot LC3 + 0,45 \cdot LC9)$$

$$N_{Ed} = 31,20\text{ kN}$$

**Tabulka 1: Vlastnosti táhel Macalloy ve standardním provedení a v nerez provedení**

Závít	jednotka	M10	M12	M16	M20	M24	M30	M36	M42	M48	M56	M64	M76	M85	M90*	M100*
Průměr táhla	mm	10	11	15	19	22	28	34	39	45	52	60	72	82	87	97
Minimální mez kluzu	kN	25	36	69	108	156	249	364	501	660	912	1204	1756	2239	2533	3172
Minimální mez pevnosti	kN	33	48	91	143	207	330	483	665	875	1209	1596	2329	2969	3358	4206
Hmotnost táhla	Kg/m	0,50	0,75	1,40	2,20	3,00	4,80	7,10	9,40	12,50	16,70	22,20	32,00	41,50	46,70	58,00



Tabulka 10: Tabulka pevností táhel Macalloy [16]

## 6.5. Příčník (v mostovce)

Mezi hlavními nosníky konstrukce je uloženo celkem 9 příčníků jako prosté nosníky. Tyto příčníky přenášejí zatížení z podélníků do hlavní podélné nosné konstrukce. Příčníky jsou od podélníků odděleny hydroizolační vrstvou. Podélníky rovněž působí proti ztrátě příčné a torzní stability nosníku. Byl navržen profil  $240 \times 400\text{ mm}$  z LLD třídy pevnosti GL24h. Posouzení prvku bylo provedeno na prostý ohyb a smyk.

### **Průřezové charakteristiky**

$$b = 240 \text{ mm}$$

$$h = 400 \text{ mm}$$

$$A = b \cdot h = 240 \cdot 400 = 96000 \text{ mm}^2$$

$$W_y = \frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2 = \frac{1}{6} \cdot 240 \cdot 400^2 = 6,40 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

### **Materiálové charakteristiky**

$$f_{m,k} = 24,0 \text{ MPa}$$

$$f_{v,k} = 2,7 \text{ MPa}$$

$$\gamma_M = 1,25$$

$$k_{mod} = 0,7 \text{ (LLD, krátkodobé zatížení)}$$

$$k_{def} = 2,0 \text{ (součinitel zvětšování deformací následkem dotvarování)}$$

$$k_{cr} = 0,67 \text{ (součinitel vlivu výsušných trhlin)}$$

### **Posudek MSÚ v ohybu**

Rozhodující kombinace zatížení:

$$\text{NC9 (1,35} \cdot \text{LC1 + 1,35} \cdot \text{LC2 + 1,35} \cdot \text{LC3 + 0,45} \cdot \text{LC9)}$$

$$M_{y,Ed} = 51,90 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{y,Ed}}{W_y} = \frac{51,90 \cdot 10^6}{6,40 \cdot 10^6} = 8,11 \text{ MPa}$$

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{m,k}}{\gamma_M} = \frac{0,7 \cdot 24,0}{1,25} = 13,44 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,d} = 8,11 \text{ MPa} < f_{m,d} = 13,44 \text{ MPa}$$

**VYHOVUJE**

### Posudek MSÚ ve smyku

Rozhodující kombinace zatížení:

$$NC9 (1,35 \cdot LC1 + 1,35 \cdot LC2 + 1,35 \cdot LC3 + 0,45 \cdot LC9)$$

$$V_{z,Ed} = 59,47 \text{ kN}$$

$$\tau_{v,d} = \frac{1,5 \cdot V_{Ed}}{k_{cr} \cdot A} = \frac{1,5 \cdot 59,47 \cdot 10^3}{0,67 \cdot 96000} = 1,39 \text{ MPa}$$

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_M} = \frac{0,7 \cdot 2,7}{1,25} = 1,51 \text{ MPa}$$

$$\tau_{v,d} = 1,39 \text{ MPa} < f_{v,d} = 1,51 \text{ MPa} \quad \text{VYHOVUJE}$$

### Posudek MSP

Rozhodující kombinace zatížení:

$$NC195 (1,0 \cdot LC1 + 1,0 \cdot LC2 + 1,0 \cdot LC5 + 0,6 \cdot LC11)$$

- okamžitý průhyb:

$$w_{inst} = 5,0 \text{ mm} < \frac{L}{500} = \frac{3750}{500} = 7,5 \text{ mm} \quad \text{VYHOVUJE}$$

- konečný průhyb:

$$w_{fin} = (1 + k_{def}) \cdot w_{inst} = (1 + 2) \cdot 5,0 = 15,0 \text{ mm}$$

$$w_{fin} = 15,0 \text{ mm} < \frac{L}{250} = \frac{3750}{250} = 15,0 \text{ mm} \quad \text{VYHOVUJE}$$

## 6.6. Příčník (v oblouku)

Příčníky v oblouku fungují společně s diagonálními prvky jako rámové ztužení. Celkem bylo mezi oblouky navrženo 9 těchto prvků. Nejnižše umístěný příčník je 2,7 m nad úrovní mostovky, aby nebyla narušena minimální průchozí výška. Byl navržen profil 240×300 mm z LLD třídy pevnosti GL24h. Posouzení prvku bylo provedeno na vzpěrný tlak a tah rovnoběžně s vlákny.

### **Průřezové charakteristiky**

$$b = 200 \text{ mm}$$

$$h = 300 \text{ mm}$$

$$A = b \cdot h = 200 \cdot 300 = 60000 \text{ mm}^2$$

$$I_y = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 = \frac{1}{12} \cdot 200 \cdot 300^3 = 4,50 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

$$I_z = \frac{1}{12} \cdot h \cdot b^3 = \frac{1}{12} \cdot 300 \cdot 200^3 = 2,00 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{4,50 \cdot 10^8}{60000}} = 86,60 \text{ mm}$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = \sqrt{\frac{2,00 \cdot 10^8}{60000}} = 57,74 \text{ mm}$$

### **Materiálové charakteristiky**

$$f_{c,0,k} = 24,0 \text{ MPa}$$

$$f_{t,0,k} = 16,5 \text{ MPa}$$

$$\gamma_M = 1,25$$

$$k_{mod} = 0,7 \text{ (LLD, krátkodobé zatížení)}$$

$$k_{def} = 2,0 \text{ (součinitel zvětšování deformací následkem dotvarování)}$$

### **Posudek MSÚ na vzpěrný tlak**

Rozhodující kombinace zatížení:

$$\text{NC44} (1,35 \cdot \text{LC1} + 1,35 \cdot \text{LC2} + 0,54 \cdot \text{LC4} + 1,5 \cdot \text{LC8})$$

$$N_{Ed,-} = -26,35 \text{ kN}$$

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Ed,-}}{A} = \frac{26,35 \cdot 10^3}{6,0 \cdot 10^4} = 0,44 \text{ MPa}$$

Součinitel vzpěrnosti:

$$L_{cr,y} = 3750 \text{ mm (vzpěrná délka vertikální)}$$

$$L_{cr,z} = 1875 \text{ mm (vzpěrná délka horizontální)}$$

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{3750}{86,60} = 43,30$$

$$\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{1875}{57,74} = 32,48$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{43,30}{\pi} \sqrt{\frac{24,0}{9400}} = 0,70$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{32,48}{\pi} \sqrt{\frac{24,0}{9400}} = 0,52$$

$$\beta_c = 0,1 \text{ (pro LLD)}$$

$$k_y = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2)$$

$$k_y = 0,5 \cdot (1 + 0,1 \cdot (0,70 - 0,3) + 0,70^2) = 0,76$$

$$k_z = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2)$$

$$k_z = 0,5 \cdot (1 + 0,1 \cdot (0,52 - 0,3) + 0,52^2) = 0,65$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{0,76 + \sqrt{0,76^2 - 0,70^2}} = 0,93$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{0,65 + \sqrt{0,65^2 - 0,52^2}} = 0,97$$

$$f_{c,0,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_M} = \frac{0,7 \cdot 24,0}{1,25} = 13,44 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,0,d} = 0,44 \text{ MPa} < k_{c,y} \cdot f_{c,0,d} = 0,93 \cdot 13,44 = 12,53 \text{ MPa} \quad \text{VYHOVUJE}$$



### *Posudek MSÚ v tahu rovnoběžně s vlákny*

Rozhodující kombinace zatížení:

$$NC44 (1,35 \cdot LC1 + 1,35 \cdot LC2 + 0,54 \cdot LC4 + 1,5 \cdot LC8)$$

$$N_{Ed,+} = 24,33 \text{ kN}$$

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{Ed,+}}{A} = \frac{24,33 \cdot 10^3}{6,0 \cdot 10^4} = 0,41 \text{ MPa}$$

$$f_{t,0,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_M} = \frac{0,7 \cdot 16,5}{1,25} = 9,24 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{t,0,d} = 0,41 \text{ MPa} < f_{t,0,d} = 9,24 \text{ MPa}$$

VYHOVUJE

## **6.7. Ztužidlo (v oblouku)**

Funkce ztužidel, jak vyplývá i z názvu prvku, už byla popsána v kapitole 6.6. Dvojice kloubově připojených ztužidel ve tvaru obráceného „V“ vyplňuje vždy prostor mezi dvěma obloukovými příčníky. Vzpěrná délka prvku je rovna jeho délce  $l = 3271 \text{ mm}$ . Byl navržen profil ztužidel  $180 \times 180 \text{ mm}$  z LLD třídy pevnosti GL24h. Posouzení prvku bylo provedeno na vzpěrný tlak a tah rovnoběžně s vlákny.

### **Průřezové charakteristiky**

$$b = 180 \text{ mm}$$

$$h = 180 \text{ mm}$$

$$A = b \cdot h = 180 \cdot 180 = 32400 \text{ mm}^2$$

$$I_y = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 = \frac{1}{12} \cdot 180 \cdot 180^3 = 9,72 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{9,72 \cdot 10^5}{32400}} = 51,96 \text{ mm}$$

## Materiálové charakteristiky

$$f_{c,0,k} = 24,0 \text{ MPa}$$

$$f_{t,0,k} = 16,5 \text{ MPa}$$

$$\gamma_M = 1,25$$

$$k_{mod} = 0,7 \text{ (LLD, krátkodobé zatížení)}$$

## Posudek MSÚ na vzpěrný tlak

Rozhodující kombinace zatížení:

$$\text{NC44 } (1,35 \cdot \text{LC1} + 1,35 \cdot \text{LC2} + 0,54 \cdot \text{LC4} + 1,5 \cdot \text{LC8})$$

$$N_{Ed,-} = -44,75 \text{ kN}$$

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Ed,-}}{A} = \frac{44,75 \cdot 10^3}{3,24 \cdot 10^4} = 1,38 \text{ MPa}$$

Součinitel vzpěrnosti:

$$L_{cr,y} = 3271 \text{ mm}$$

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{3271}{51,96} = 62,95$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{62,95}{\pi} \sqrt{\frac{24,0}{9400}} = 1,01$$

$$\beta_c = 0,1 \text{ (pro LLD)}$$

$$k_y = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2)$$

$$k_y = 0,5 \cdot (1 + 0,1 \cdot (1,01 - 0,3) + 1,01^2) = 1,05$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{1,05 + \sqrt{1,05^2 - 1,01^2}} = 0,76$$

$$f_{c,0,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_M} = \frac{0,7 \cdot 24,0}{1,25} = 13,44 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,0,d} = 1,38 \text{ MPa} < k_{c,y} \cdot f_{c,0,d} = 0,76 \cdot 13,44 = 10,19 \text{ MPa} \quad \text{VYHOVUJE}$$

### **Posudek MSÚ v tahu rovnoběžně s vlákny**

Rozhodující kombinace zatížení:

$$\text{NC44 } (1,35 \cdot \text{LC1} + 1,35 \cdot \text{LC2} + 0,54 \cdot \text{LC4} + 1,5 \cdot \text{LC8})$$

$$N_{Ed,+} = 43,90 \text{ kN}$$

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{Ed,+}}{A} = \frac{43,90 \cdot 10^3}{3,24 \cdot 10^4} = 1,35 \text{ MPa}$$

$$f_{t,0,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_M} = \frac{0,7 \cdot 16,5}{1,25} = 9,24 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{t,0,d} = 1,35 \text{ MPa} < f_{t,0,d} = 9,24 \text{ MPa} \quad \text{VYHOVUJE}$$

## **6.8. Ztužidlo (v mostovce)**

### **6.8.1. Táhlo Macalloy**

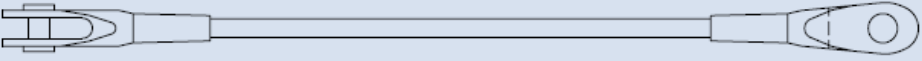
Původní myšlenkou pro vytvoření mostovkového ztužení bylo použití dvojice překřížených táhel Macalloy mezi všemi příčníky. Délka táhel byla 5,3 m. Byla navržena táhla z nerezové oceli S460 o  $\phi$  15 mm.

Rozhodující kombinace zatížení:

$$\text{NC44 } (1,35 \cdot \text{LC1} + 1,35 \cdot \text{LC2} + 0,54 \cdot \text{LC4} + 1,5 \cdot \text{LC8})$$

$$N_{Ed} = 62,78 \text{ kN}$$

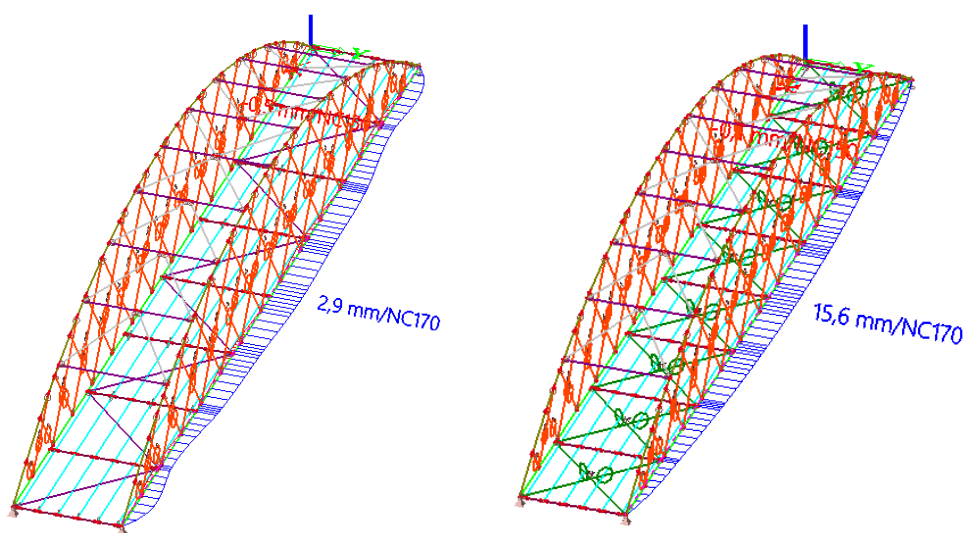
Tabulka 1: Vlastnosti táhel Macalloy ve standardním provedení a v nerez provedení																
Závít	jednotka	M10	M12	M16	M20	M24	M30	M36	M42	M48	M56	M64	M76	M85	M90*	M100*
Průměr táhla	mm	10	11	15	19	22	28	34	39	45	52	60	72	82	87	97
Minimální mez kluzu	kN	25	36	69	108	156	249	364	501	660	912	1204	1756	2239	2533	3172
Minimální mez pevnosti	kN	33	48	91	143	207	330	483	665	875	1209	1596	2329	2969	3358	4206
Hmotnost táhla	Kg/m	0,50	0,75	1,40	2,20	3,00	4,80	7,10	9,40	12,50	16,70	22,20	32,00	41,50	46,70	58,00



Tabulka 11: Tabulka pevností táhel Macalloy [16]

### 6.8.2. Dřevěný hranol

Druhou navrženou variantou ztužení byl systém vodorovného příhradového nosníku, kde byly hranoly použity jako diagonální prvky. Hranoly byly navrženy z GL24h profilu 200×200 mm. Toto řešení se ukázalo jako vhodnější jak z hlediska ekonomického (poloviční počet prvků, levnější materiál), tak statického (menší vodorovná deformace hlavních nosníků patrná na obrázku 36). Posouzení prvku bylo provedeno na vzpěrný tlak a tah rovnoběžně s vlákny.



Obrázek 36: Porovnání vodorovných deformací (vlevo dřevěné hranoly, vpravo táhla)

### **Průřezové charakteristiky**

$$b = 200 \text{ mm}$$

$$h = 200 \text{ mm}$$

$$A = b \cdot h = 200 \cdot 200 = 40000 \text{ mm}^2$$

$$I_y = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 = \frac{1}{12} \cdot 200 \cdot 200^3 = 1,33 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{1,33 \cdot 10^6}{40000}} = 57,74 \text{ mm}$$

### **Materiálové charakteristiky**

$$f_{c,0,k} = 24,0 \text{ MPa}$$

$$f_{t,0,k} = 16,5 \text{ MPa}$$

$$\gamma_M = 1,25$$

$$k_{mod} = 0,7 \text{ (LLD, krátkodobé zatížení)}$$

### **Posudek MSÚ na vzpěrný tlak**

Rozhodující kombinace zatížení:

$$NC59 (1,0 \cdot LC1 + 1,0 \cdot LC2 + 0,54 \cdot LC4 + 1,5 \cdot LC8)$$

$$N_{Ed,-} = -42,68 \text{ kN}$$

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Ed,-}}{A} = \frac{42,68 \cdot 10^3}{4 \cdot 10^4} = 1,07 \text{ MPa}$$

Součinitel vzpěrnosti:

$$L_{cr,y} = 5303 \text{ mm}$$

$$\lambda_y = \frac{l_{cr,y}}{i_y} = \frac{5303}{57,74} = 91,85$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{91,85}{\pi} \sqrt{\frac{24,0}{9400}} = 1,48$$

$$\beta_c = 0,1 \text{ (pro LLD)}$$

$$k_y = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2)$$

$$k_y = 0,5 \cdot (1 + 0,1 \cdot (1,48 - 0,3) + 1,48^2) = 1,65$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{1,65 + \sqrt{1,65^2 - 1,48^2}} = 0,42$$

$$f_{c,0,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_M} = \frac{0,7 \cdot 24,0}{1,25} = 13,44 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,0,d} = 1,07 \text{ MPa} < k_{c,y} \cdot f_{c,0,d} = 0,42 \cdot 13,44 = 5,63 \text{ MPa} \quad \text{VYHOVUJE}$$

### **Posudek MSÚ v tahu rovnoběžně s vlákny**

Rozhodující kombinace zatížení:

$$\text{NC44 } (1,35 \cdot \text{LC1} + 1,35 \cdot \text{LC2} + 0,54 \cdot \text{LC4} + 1,5 \cdot \text{LC8})$$

$$N_{Ed,+} = 87,64 \text{ kN}$$

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{Ed,+}}{A} = \frac{87,64 \cdot 10^3}{4 \cdot 10^4} = 2,19 \text{ MPa}$$

$$f_{t,0,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_M} = \frac{0,7 \cdot 16,5}{1,25} = 9,24 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{t,0,d} = 2,19 \text{ MPa} < f_{t,0,d} = 9,24 \text{ MPa} \quad \text{VYHOVUJE}$$

## 6.9. Podélník

V příčném řezu mostovky se nachází 6 podélníků v rozteči 690 mm. Tyto nosníky byly navrženy jako spojitě o dvou nebo třech polích,  $L_{pole} = 3750 \text{ mm}$ . Výpočet podélníků byl proveden na samostatném rovinném modelu. Podélník byl zatížen stálým zatížením [2] a šachovnicově uspořádaným zatížením od chodců [6]. Byl navržen profil 100×200 mm z LLD pevnosti GL24h. V MSÚ byl nosník posouzen na namáhání ohybem a smykem.



Obrázek 37: Statické schéma podélníku zatíženého chodci

### Průřezové charakteristiky

$$b = 100 \text{ mm}$$

$$h = 200 \text{ mm}$$

$$A = b \cdot h = 100 \cdot 200 = 20000 \text{ mm}^2$$

$$W_y = \frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2 = \frac{1}{6} \cdot 100 \cdot 200^2 = 6,67 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

### Materiálové charakteristiky

$$f_{m,k} = 24,0 \text{ MPa}$$

$$f_{v,k} = 2,7 \text{ MPa}$$

$$\gamma_M = 1,25$$

$$k_{mod} = 0,7 \text{ (LLD, krátkodobé zatížení)}$$

$$k_{def} = 2,0 \text{ (součinitel zvětšování deformací následkem dotvarování)}$$

$$k_{cr} = 0,67 \text{ (součinitel vlivu výsušných trhlin)}$$

### Posudek MSÚ v ohybu

$$M_{y,Ed} = 7,61 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{y,Ed}}{W_y} = \frac{7,61 \cdot 10^6}{6,67 \cdot 10^5} = 11,42 \text{ MPa}$$

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{m,k}}{\gamma_M} = \frac{0,7 \cdot 24,0}{1,25} = 13,44 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,d} = 11,42 \text{ MPa} < f_{m,d} = 13,44 \text{ MPa}$$

VYHOVUJE

### Posudek MSÚ ve smyku

$$V_{z,Ed} = 11,32 \text{ kN}$$

$$\tau_{v,d} = \frac{1,5 \cdot V_{Ed}}{k_{cr} \cdot A} = \frac{1,5 \cdot 11,32 \cdot 10^3}{0,67 \cdot 20000} = 1,27 \text{ MPa}$$

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_M} = \frac{0,7 \cdot 2,7}{1,25} = 1,51 \text{ MPa}$$

$$\tau_{v,d} = 1,27 \text{ MPa} < f_{v,d} = 1,51 \text{ MPa}$$

VYHOVUJE

### Posudek MSP

- okamžitý průhyb:

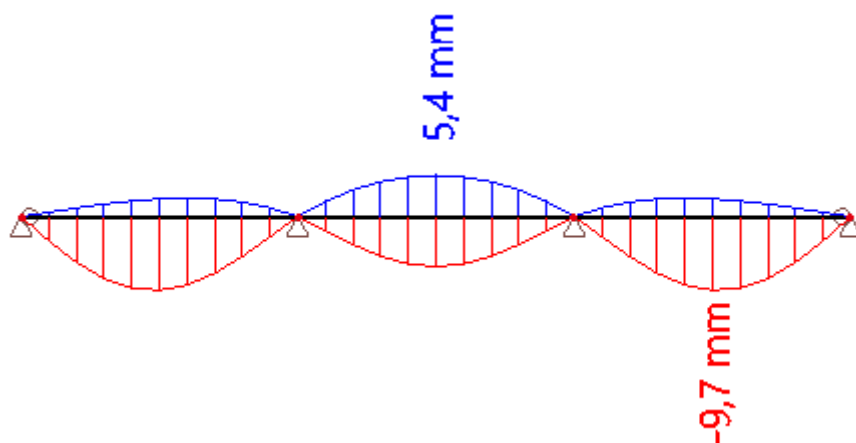
$$w_{inst} = 9,7 \text{ mm} < \frac{L}{350} = \frac{3750}{350} = 10,7 \text{ mm}$$

VYHOVUJE

$$w_{G,inst} = 0,4 \text{ mm}$$

$$w_{Q,inst} = 9,3 \text{ mm}$$





Obrázek 38: Celkový okamžitý průhyb podélníku

- konečný průhyb:

$$w_{fin} = (1 + k_{def}) \cdot w_{G,inst} + (1 + \psi_2 \cdot k_{def}) \cdot w_{Q,inst}$$

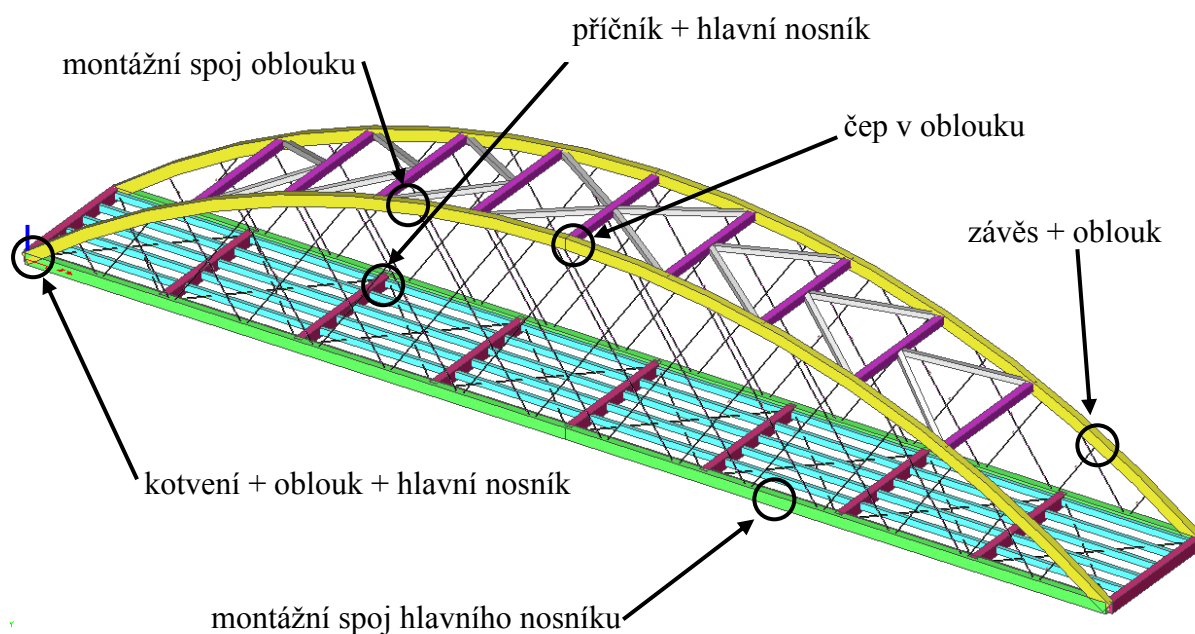
$$w_{fin} = (1 + 2) \cdot 0,4 + (1 + 0 \cdot 2) \cdot 9,3 = 10,5$$

$$w_{fin} = 10,5 \text{ mm} < \frac{L}{250} = \frac{3750}{250} = 15,0 \text{ mm}$$

VYHOVUJE

## 7. NÁVRH A POSUDEK SPOJŮ

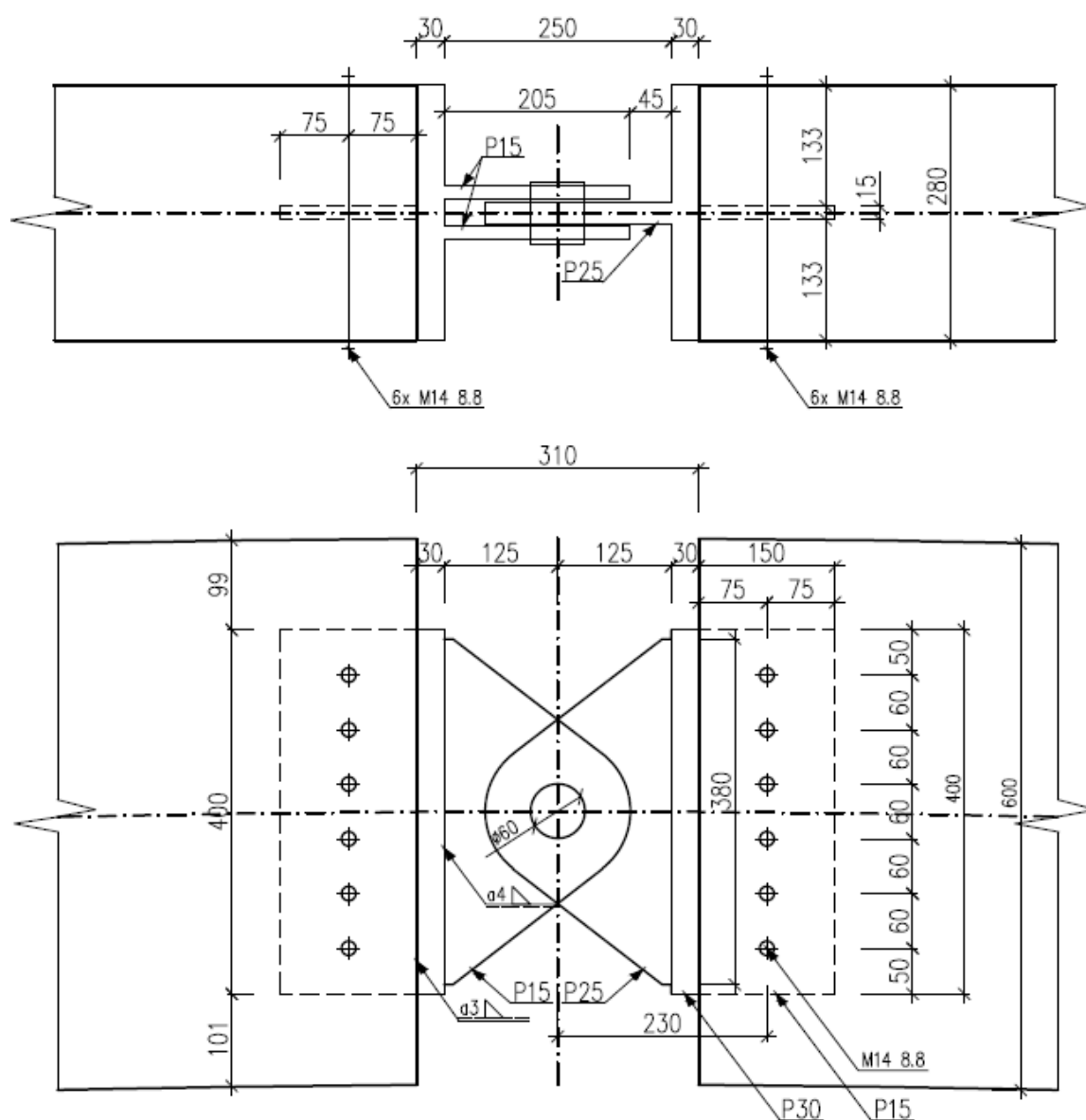
Na obrázku 39 jsou označeny spoje, které byly následně navrženy a posouzeny dle ČSN EN 1995-1-1 [8] a ČSN EN 1993-1-8 [7]. Navržené spoje v konstrukci byly typu ocel – dřevo s využitím spojovacích prostředků kolíkového typu (svorníky, samovrtné kolíky) a vložených ocelových plechů.



Obrázek 39: Označení posuzovaných spojů

## 7.1. Čep ve vrcholu oblouku

Statické schéma trojkloubového oblouku bylo důvodem pro navržení čepového spoje ve vrcholu oblouku [7]. Svorníky M14 8.8 s vloženým plechem byly posuzovány jako dvojstřížný spoj ocel – dřevo, dále bylo posouzeno otláčení dřeva od čelního plechu, čepové ložisko a svary jednotlivých plechů. Spoj byl posouzen na působení posouvající síly a její excentricity ke středu otáčení skupiny svorníků.



Obrázek 40: Schéma čepového spoje

### *Vnitřní síly působící ve spoji*

$$N_{Ed} = -382,98 \text{ kN} \quad \text{NC9} (1,35 \cdot \text{LC1} + 1,35 \cdot \text{LC2} + 1,35 \cdot \text{LC3} + 0,45 \cdot \text{LC9})$$

$$V_{Ed} = 10,00 \text{ kN} \quad \text{NC100} (1,35 \cdot \text{LC1} + 1,35 \cdot \text{LC2} + 1,35 \cdot \text{LC5} + 0,9 \cdot \text{LC11})$$

### *Návrh a posouzení čelní desky a otlačení dřeva od čelní desky*

Čelní deska – ocel S355:

$$t_l = 30 \text{ mm}$$

$$b = 280 \text{ mm}$$

$$h = 400 \text{ mm}$$

$$f_y = 355 \text{ MPa}$$

$$f_u = 510 \text{ MPa}$$

Plocha otlačení dřeva:

$$A_d = b \cdot h = 0,28 \cdot 0,40 = 112000 \text{ mm}^2$$

Normálové napětí rovnoběžně s vlákny dřeva:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Ed}}{A_d} = \frac{382,98}{0,112} = 3,42 \text{ MPa}$$

**Posouzení napětí v tlaku rovnoběžně s vlákny dřeva:**

$$\sigma_{c,0,d} = 3,42 \text{ MPa} < f_{c,0,d} = 13,44 \text{ MPa}$$

**VYHOVUJE**

Vložený plech – ocel S355:

$$t_p = 15 \text{ mm}$$

$$b = 150 \text{ mm}$$

$$h = 400 \text{ mm}$$

$$f_y = 355 \text{ MPa}$$

$$f_u = 510 \text{ MPa}$$

Ohybový moment vznikající v čelním plechu od normálové síly:

$$t_1 = \frac{(b-t_p)}{2} = \frac{(280-15)}{2} = 132,5 \text{ mm}$$

$$W_{y,p} = \frac{1}{6} \cdot h \cdot t_d^2 = \frac{1}{6} \cdot 400 \cdot 30^2 = 60000 \text{ mm}^3$$

$$M_y = \frac{N_{Ed}}{2} \cdot \left( \frac{t_p}{2} + \frac{t_1}{2} \right) = \frac{382,98}{2} \cdot \left( \frac{15}{2} + \frac{132,5}{2} \right) = 4,31 \text{ kNm}$$

Napětí za ohybu v čelní desce:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_y}{W_y} = \frac{4,31 \cdot 10^6}{60000} = 71,8 \text{ MPa}$$

**Posouzení napětí za ohybu:**

$$\sigma_{m,d} = 71,8 \text{ MPa} < f_y = 355,0 \text{ MPa}$$

**VYHOVUJE**

### *Návrh a posouzení svorníkového spoje*

$$d = 14 \text{ mm}$$

$$d_0 = 16 \text{ mm}$$

$$n = 6 \text{ ks}$$

$$f_{ub} = 800 \text{ MPa}$$

Osové vzdálenosti svorníků:

$$\alpha = 90^\circ \text{ (úhel zatížení vzhledem k vláknům)}$$

$$a_1 = (4 + \cos \alpha) \cdot d = 56 \text{ mm} \quad \text{-pouze 1 svislá řada}$$

$$a_2 = 4 \cdot d = 56 \text{ mm} \quad \text{-navrženo 60 mm}$$

$$a_{3,c} = 4 \cdot d = 56 \text{ mm} \quad \text{-navrženo 60 mm}$$

$$a_{4,t} = \max [(2 + 2 \cdot \sin \alpha) \cdot d; 3 \cdot d] = 56 \text{ mm} \quad \text{-navrženo 60 mm}$$

Excentricita vznikající od smykové síly:

$$e = 230 \text{ mm}$$

Zatížení na jeden svorník:

$$F_v = \frac{V_{Ed}}{n} = \frac{10,00}{6} = 1,67 \text{ kN}$$

Síla vznikající od excentricity zatížení:

$$r_1 = 30 \text{ mm (vzdálenost poloměru otáčení svorníku od vodorovné osy plechu)}$$

$$r_2 = 90 \text{ mm}$$

$$r_3 = 150 \text{ mm}$$

$$F_m = \frac{V_{Ed} \cdot e \cdot r_3}{2 \cdot r_1^2 + 2 \cdot r_2^2 + 2 \cdot r_3^2} = \frac{10,0 \cdot 0,23 \cdot 0,15}{2 \cdot 0,03^2 + 2 \cdot 0,09^2 + 2 \cdot 0,15^2} = 5,48 \text{ kN}$$

Výsledná síla ve střihu na 1 svorník:

$$F_{v,Ed} = \sqrt{F_v^2 + F_m^2} = \sqrt{1,67^2 + 5,48^2} = 5,72 \text{ kN}$$

Charakteristická pevnost v otlacení ve dřevěném prvku – předvrtávané otvory:

$$f_{h,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot 14) \cdot 380 = 26,80 \text{ MPa}$$

$$k_{90} = 1,35 + 0,015 \cdot d = 1,35 + 0,015 \cdot 14 = 1,56$$

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} = \frac{26,80}{1,56 \cdot \sin^2 90^\circ + \cos^2 90^\circ} = 17,18 \text{ MPa}$$

Charakteristický plastický moment únosnosti svorníku:

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{ub} \cdot d^{2,6} = 0,3 \cdot 800 \cdot 14^{2,6} = 229163 \text{ Nmm}$$

Charakteristická únosnost jednoho svorníku:

$$t_1 = \frac{(b-t_p)}{2} = \frac{(280-15)}{2} = 132,5 \text{ mm}$$

$$F_{v,Rk} = \left( \frac{f_{h,\alpha,k} \cdot t_1 \cdot d}{f_{h,\alpha,k} \cdot t_1 \cdot d \cdot \left[ \sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,\alpha,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right]} \right)$$

$$F_{v,Rk} = \left( \frac{17,18 \cdot 132,5 \cdot 14}{17,18 \cdot 132,5 \cdot 14 \cdot \left[ \sqrt{2 + \frac{4 \cdot 229163}{17,18 \cdot 14 \cdot 132,5^2}} - 1 \right]} \right)$$

$$F_{v,Rk} = \left( \frac{17,18 \cdot 132,5 \cdot 14}{2,3 \cdot \sqrt{229163 \cdot 17,18 \cdot 14}} \right)$$

$$F_{v,Rk} = \min \begin{pmatrix} 31,87 \text{ kN} \\ 15,58 \text{ kN} \\ 17,08 \text{ kN} \end{pmatrix} = 15,58 \text{ kN}$$

Návrhová únosnost jednoho svorníku:

$$F_{v,Rd} = k_{mod} \cdot \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_M} = 0,7 \cdot \frac{15,58}{1,30} = 8,39 \text{ kN}$$

**Posouzení únosnosti svorníků pro maximální smykové namáhání:**

$$F_{v,Ed} = 5,72 \text{ kN} < F_{v,Rd} = 8,39 \text{ kN} \quad \text{VYHOVUJE}$$

*Posouzení únosnosti styčnickového plechu v otlačení*

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{800}{510} = 1,57 \\ \frac{e_1}{3 \cdot d_0} = \frac{50}{3 \cdot 16} = 1,04 \\ \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - 0,25 = \frac{60}{3 \cdot 16} - 0,25 = 1,00 \end{array} \right\} = 1,00$$

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \cdot \frac{75}{16} - 1,7 = 11,43 \\ 1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 \cdot \frac{0}{16} - 1,7 = -1,70 \end{array} \right\} = 2,5$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t_p}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 1,00 \cdot 510 \cdot 14 \cdot 15}{1,25} = 214,20 \text{ kN}$$

**Posouzení styčnickového plechu na otlačení:**

$$F_{v,Ed} = 5,72 \text{ kN} < F_{b,Rd} = 214,20 \text{ kN} \quad \text{VYHOVUJE}$$

*Návrh a posouzení koutového svaru přípoje čelní desky se styčnickovým plechem*

$a = 3 \text{ mm}$  (účinná výška svaru)

$l = 400 \text{ mm}$  (účinná délka svaru)

$\beta_w = 0,9$  (korekční součinitel pro ocel S355)

Excentricita vznikající mezi posouvající silou a svarem:

$$e = 155 \text{ mm}$$

$$A_w = 2 \cdot l \cdot a = 2 \cdot 400 \cdot 3 = 2400 \text{ mm}^2 \text{ (průřezová plocha svarového obrazce)}$$

Složky napětí působící ve svaru:

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_{Ed}}{A_w} = \frac{10,00 \cdot 10^3}{2400} = 4,17 \text{ MPa}$$

$$\sigma_w = \frac{V_{Ed} \cdot e}{2 \cdot \frac{1}{6} \cdot a \cdot l^2} + \frac{N_{Ed}}{A_w} = \frac{10,00 \cdot 155}{2 \cdot \frac{1}{6} \cdot 3 \cdot 400^2} + \frac{382,98}{2400} = 169,26 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma_w}{\sqrt{2}} = \frac{169,26}{\sqrt{2}} = 119,69 \text{ MPa}$$

**Posouzení svaru:**

$$\sigma_{\perp} = 119,7 \text{ MPa} < \frac{0,9 \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 510}{1,25} = 367,2 \text{ MPa} \quad \text{VYHOVUJE}$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}$$

$$\sqrt{119,69^2 + 3 \cdot (119,69^2 + 4,17^2)} \leq \frac{510}{0,9 \cdot 1,25}$$

$$239,5 \text{ MPa} < 453,3 \text{ MPa} \quad \text{VYHOVUJE}$$

### *Návrh a posouzení čepového ložiska*

Čep - Třída pevnosti 4.6:

$$f_{y,p} = 240 \text{ MPa}$$

$$f_{u,p} = 400 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

$$\gamma_{M0} = 1,00$$

Plechý – ocel S355:

$$f_y = 355 \text{ MPa}$$

$$f_u = 510 \text{ MPa}$$

Výsledná síla zatěžující čep:



$$F_{v,Ed} = \sqrt{N_{Ed}^2 + V_{Ed}^2} = \sqrt{382,98^2 + 10,00^2} = 383,11 \text{ kN}$$

Tloušťka čepového plechu:

$$t_{p,1} \geq 0,7 \cdot \sqrt{\frac{F_{v,Ed} \cdot \gamma_{M0}}{355}} = 0,7 \cdot \sqrt{\frac{383,11 \cdot 1,0}{355}} = 23,0 \text{ mm} \quad \text{-navrženo 25 mm}$$

Návrh geometrie plechu a čepu:

$$d_0 \leq 2,5 \cdot t_{p,1} = 2,5 \cdot 25 = 62,5 \text{ mm} \quad \text{-navrženo 60 mm}$$

$$a \geq \frac{F_{v,Ed} \cdot \gamma_{M0}}{2 \cdot t \cdot f_y} + \frac{2 \cdot d_0}{3} = \frac{383,11 \cdot 1,0}{2 \cdot 25 \cdot 355} + \frac{2 \cdot 60}{3} = 40,0 \text{ mm} \quad \text{-navrženo 50 mm}$$

$$c \geq \frac{F_{v,Ed} \cdot \gamma_{M0}}{2 \cdot t \cdot f_y} + \frac{d_0}{3} = \frac{383,11 \cdot 1,0}{2 \cdot 25 \cdot 355} + \frac{60}{3} = 20,0 \text{ mm} \quad \text{-navrženo 50 mm}$$

Plocha průřezu čepu:

$$A_{\text{čep}} = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 60^2 = 2827 \text{ mm}^2$$

Únosnost čepu ve střihu:

$$F_{v,Rd} = 0,6 \cdot \frac{f_{up} \cdot A_{\text{čep}}}{\gamma_{M2}} = 0,6 \cdot \frac{400 \cdot 2827^2}{1,25} = 542,87 \text{ kN}$$

**Posouzení čepu na namáhání střihem:**

$$F_{v,Ed} = 383,11 \text{ kN} < F_{v,Rd} = 542,87 \text{ kN} \quad \text{VYHOVUJE}$$

Únosnost čepu a plechu v otláčení:

$$F_{b,Rd} = 1,5 \cdot t_{p,1} \cdot d \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 1,5 \cdot 25 \cdot 60 \cdot \frac{240}{1,0} = 540,00 \text{ kN}$$

**Posouzení čepu a plechu v otláčení:**

$$F_{v,Ed} = 383,11 \text{ kN} < F_{b,Rd} = 540,00 \text{ kN} \quad \text{VYHOVUJE}$$

Únosnost čepu v ohybu:

$$W_0 = \frac{\pi \cdot d^3}{32} = \frac{\pi \cdot 60^3}{32} = 21206 \text{ mm}^3$$

$$t_2 = 15 \text{ mm} \text{ (tloušťka krajních plechů)}$$

$t_3 = 2 \text{ mm}$  (vzdálenost mezi plechy)

$$M_{Ed} = \frac{F_{v,Ed}}{8} \cdot (t_1 + 2 \cdot t_2 + 4 \cdot t_3) = \frac{383,11}{8} \cdot (25 + 2 \cdot 15 + 4 \cdot 2) = 3,02 \text{ kNm}$$

$$M_{Rd} = 1,5 \cdot W_0 \cdot \frac{f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = 1,5 \cdot 21206 \cdot \frac{240}{1,00} = 7,63 \text{ kNm}$$

**Posouzení čepu na ohyb a na kombinaci ohybu a stříhu:**

$$M_{Ed} = 3,02 \text{ kNm} < M_{Rd} = 7,63 \text{ kNm} \quad \text{VYHOVUJE}$$

$$\left(\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}}\right)^2 = \left(\frac{3,02}{7,63}\right)^2 + \left(\frac{383,11}{542,87}\right)^2 \leq 1$$

$$0,65 < 1 \quad \text{VYHOVUJE}$$

#### *Návrh a posouzení koutového svaru přípoje čelní desky k čepovému plechu*

$a = 3 \text{ mm}$  (účinná výška svaru)

$l = 380 \text{ mm}$  (účinná délka svaru)

$\beta_w = 0,9$  (korekční součinitel pro ocel S355)

Excentricita vznikající mezi posouvající silou a svarem:

$$e = 125 \text{ mm}$$

$$A_w = 2 \cdot l \cdot a = 2 \cdot 380 \cdot 3 = 2280 \text{ mm}^2 \text{ (průřezová plocha svarového obrazce)}$$

Složky napětí působící ve svaru:

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_{Ed}}{A_w} = \frac{10,00 \cdot 10^3}{2280} = 4,39 \text{ MPa}$$

$$\sigma_w = \frac{V_{Ed} \cdot e}{2 \cdot \frac{1}{6} \cdot a \cdot l^2} + \frac{N_{Ed}}{A_w} = \frac{10,00 \cdot 125}{2 \cdot \frac{1}{6} \cdot 3 \cdot 380^2} + \frac{382,98}{2280} = 176,63 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma_w}{\sqrt{2}} = \frac{176,63}{\sqrt{2}} = 124,90 \text{ MPa}$$

**Posouzení svaru:**

$$\sigma_{\perp} = 124,90 \text{ MPa} < \frac{0,9 \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 510}{1,25} = 367,2 \text{ MPa} \quad \text{VYHOVUJE}$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}$$

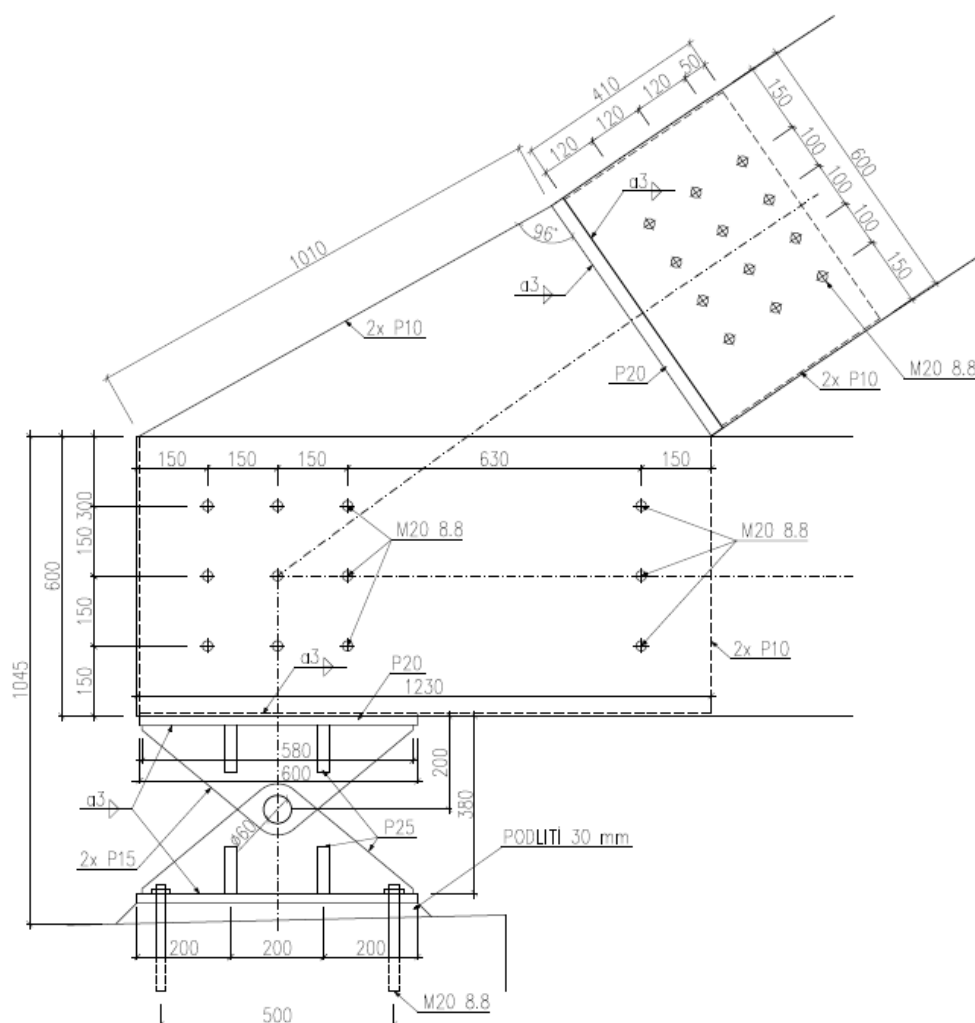
$$\sqrt{124,90^2 + 3 \cdot (124,90^2 + 4,39^2)} \leq \frac{510}{0,9 \cdot 1,25}$$

$$\mathbf{249,9\ MPa} < 453,3\ MPa$$

**VYHOVUJE**

## 7.2. Spoj oblouku a hlavního nosníku s kotvícím čepem

Spojení paty oblouku s koncem hlavního nosníku bylo navrženo jako čtyřstržný spoj ocel - dřevo. Spoj byl proveden pomocí dvojice vložených styčnickových plechů P10, svorníků M20 8.8 a čelní desky P20. K tomuto spoji byl zespodu připojen ještě kotevní čep pomocí přivařené čelní desky P20. Volná část spodních vložených plechů byla zajištěna trojicí svorníků M20. Čepové ložisko bylo navrženo  $\phi 60\text{ mm}$  s čepovým plechem P25. Svorníkový spoj i čelní deska pro připojení oblouku byly dimenzovány na přenesení maximální tlakové síly do spoje. Připojení hlavního nosníku bylo dimenzováno na maximální tahové namáhání. Čepový plech a ložisko bylo dimenzováno na výslednici svislé a vodorovné reakce v podpoře a posouzeno dle normy [7]. Pevné podpory byly navrženy jako čepová ložiska, posuny u jednosměrně posuvných ložisek jsou dovoleny oválnými otvory v dolních čepových pleších.



Obrázek 41: Schéma spoje oblouku s hlavním nosníkem a pevným čepem

### ***Vnitřní síly působící ve spoji***

Rozhodující kombinace zatížení:

$$NC9 (1,35 \cdot LC1 + 1,35 \cdot LC2 + 1,35 \cdot LC3 + 0,45 \cdot LC9))$$

$$N_{Ed,oblouk} = -405,85 \text{ kN}$$

$$V_{z,přísl.} = 6,89 \text{ kN}$$

$$N_{Ed,hl.nosník} = 289,68 \text{ kN}$$

$$R_x = 35,67 \text{ kN}$$

$$R_z = 262,24 \text{ kN}$$

### ***Návrh a posouzení čelní desky a otláčení dřeva od čelní desky***

Čelní deska – ocel S355:

$$t_l = 20 \text{ mm}$$

$$b = 280 \text{ mm}$$

$$h = 600 \text{ mm}$$

$$f_y = 355 \text{ MPa}$$

$$f_u = 510 \text{ MPa}$$

Plocha otláčení dřeva:

$$A_d = b \cdot h = 280 \cdot 600 = 168000 \text{ mm}^2$$

Normálové napětí rovnoběžně s vlákny dřeva:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Ed}}{A_d} = \frac{405,85 \cdot 10^3}{0,168} = 2,42 \text{ MPa}$$

**Posouzení napětí v tlaku rovnoběžně s vlákny dřeva:**

$$\sigma_{c,0,d} = 2,42 \text{ MPa} < f_{c,0,d} = 13,44 \text{ MPa}$$

**VYHOVUJE**

Vložený plech – ocel S355:

$$t_l = 10 \text{ mm}$$

$$b = 410 \text{ mm}$$

$$h = 600 \text{ mm}$$

$$f_y = 355 \text{ MPa}$$

$$f_u = 510 \text{ MPa}$$

Ohybový moment vznikající v čelním plechu od normálové síly:

$$t_1 = 80 \text{ mm}$$

$$W_{y,p} = \frac{1}{6} \cdot h \cdot t_d^2 = \frac{1}{6} \cdot 600 \cdot 20^2 = 40000 \text{ mm}^3$$

$$M_y = \frac{N_d}{3} \cdot \left( \frac{t_p}{2} + \frac{t_1}{2} \right) = \frac{382,98}{2} \cdot \left( \frac{10}{2} + \frac{80}{2} \right) = 9,13 \text{ kNm}$$

Napětí za ohybu v čelní desce:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_y}{W_y} = \frac{9,13 \cdot 10^6}{40000} = 228,3 \text{ MPa}$$

**Posouzení napětí za ohybu:**

$$\sigma_{m,d} = 228,3 \text{ MPa} < f_y = 355,0 \text{ MPa}$$

**VYHOVUJE**

### ***Návrh a posouzení svorníkového spoje v oblouku***

$$d = 20 \text{ mm}$$

$$d_0 = 22 \text{ mm}$$

$$n_1 = 3 \text{ ks (počet svorníků v 1 řadě)}$$

$$n_{řad} = 4 \text{ (počet řad svorníků)}$$

$$n = 3 \cdot 4 = 12 \text{ ks (celkový počet svorníků)}$$

$$f_{ub} = 800 \text{ MPa}$$

Osově vzdálenosti svorníků:

$$\alpha = 0^\circ \text{ (úhel zatížení vzhledem k vláknům)}$$

$$a_1 = (4 + \cos \alpha) \cdot d = 100 \text{ mm} \quad \text{-navrženo } 120 \text{ mm}$$

$$a_2 = 4 \cdot d = 80 \text{ mm} \quad \text{-navrženo } 100 \text{ mm}$$

$$a_{3,c} = 4 \cdot d = 80 \text{ mm} \quad \text{-navrženo } 120 \text{ mm}$$

$$a_{4,t} = \max [(2 + 2 \cdot \sin \alpha) \cdot d; 3 \cdot d] = 60 \text{ mm} \quad \text{-navrženo } 150 \text{ mm}$$

Charakteristická pevnost v otlacení ve dřevěném prvku – předvrtávané otvory:

$$f_{h,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot 20) \cdot 380 = 24,93 \text{ MPa}$$

$$f_{h,\alpha,k} = f_{h,0,k} = 24,93 \text{ MPa}$$

Charakteristický plastický moment únosnosti svorníku:

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{ub} \cdot d^{2,6} = 0,3 \cdot 800 \cdot 20^{2,6} = 579281 \text{ Nmm}$$

Charakteristická únosnost jednoho svorníku:

$$t_1 = 80 \text{ mm}$$

$$F_{v,Rk} = \left( \frac{f_{h,\alpha,k} \cdot t_1 \cdot d}{2,3 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d}} \cdot \left[ \sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,\alpha,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right] \right)$$

$$F_{v,Rk} = \left( \frac{24,93 \cdot 80 \cdot 20}{2,3 \cdot \sqrt{579281 \cdot 24,93 \cdot 20}} \cdot \left[ \sqrt{2 + \frac{4 \cdot 579281}{24,93 \cdot 20 \cdot 80^2}} - 1 \right] \right)$$

$$F_{v,Rk} = \min \begin{pmatrix} 39,89 \text{ kN} \\ 25,97 \text{ kN} \\ 39,09 \text{ kN} \end{pmatrix} = 25,97 \text{ kN}$$

Návrhová únosnost jednoho svorníku v 1 stříhu:

$$F_{v,Rd} = k_{mod} \cdot \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_M} = 0,7 \cdot \frac{25,97}{1,30} = 13,98 \text{ kN}$$

Návrhová únosnost jednoho svorníku pro 4 stříhy:

$$F_{v,Rd} = 4 \cdot 13,98 = 55,93 \text{ kN}$$

Účinný počet svorníků v 1 řadě rovnoběžně s vlákny:

$$n_{ef} = \min \left\{ n^{0,9 \cdot \sqrt[4]{\frac{a_1}{13d}}} \right\} = \min \left\{ 3^{0,9 \cdot \sqrt[4]{\frac{120}{13 \cdot 20}}} \right\} = \min \left\{ \frac{3}{2,2} \right\} = 2,2$$

Síla působící na 1 řadu svorníků:

$$F_{v,Ed} = \frac{N_{Ed,oblouk}}{n_{řad}} = \frac{405,85}{4} = 101,46 \text{ kN}$$

**Posouzení únosnosti svorníků pro maximální smykové namáhání:**

$$F_{v,Ed} = 101,46 \text{ kN} < n_{ef} \cdot F_{v,Rd} = 2,2 \cdot 55,93 = 123,92 \text{ kN} \quad \text{VYHOVUJE}$$

Při posouzení byla zanedbána smyková síla  $V_{přísl.} = 6,89 \text{ kN}$ . Přípoj však disponuje rezervou únosnosti 20 %, a proto není zapotřebí další posouzení.

### *Posouzení únosnosti styčnickového plechu oblouku v otláčení*

Vložený plech – ocel S355:

$$tl. = 10 \text{ mm}$$

$$f_y = 355 \text{ MPa}$$

$$f_u = 510 \text{ MPa}$$

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{800}{510} = 1,57 \\ \frac{e_1}{3 \cdot d_0} = \frac{50}{3 \cdot 22} = 0,76 \\ \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - 0,25 = \frac{120}{3 \cdot 22} - 0,25 = 1,57 \end{array} \right\} = 0,76$$

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \cdot \frac{120}{22} - 1,7 = 17,39 \\ 1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 \cdot \frac{100}{22} - 1,7 = 4,66 \end{array} \right\} = 2,5$$



$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t_p}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,76 \cdot 510 \cdot 20 \cdot 10}{1,25} = 154,5 \text{ kN}$$

Síla působící na 1 svorník:

$$F_{v,Ed} = \frac{N_{Ed,oblouk}}{n_{rad} \cdot n_{ef}} = \frac{405,85}{4 \cdot 2,2} = 45,80 \text{ kN}$$

**Posouzení styčnickového plechu na otláčení:**

$$F_{v,Ed} = 45,8 \text{ kN} < F_{b,Rd} = 154,5 \text{ kN}$$

**VYHOVUJE**

*Návrh a posouzení koutového svaru přípoje čelní desky se styčnickovým plechem*

$$a = 3 \text{ mm (účinná výška svaru)}$$

$$l = 600 \text{ mm (účinná délka svaru)}$$

$$\beta_w = 0,9 \text{ (korekční součinitel pro ocel S355)}$$

Excentricita vznikající mezi posouvající silou a svarem:

$$e = 240 \text{ mm}$$

$$A_w = 2 \cdot l \cdot a = 2 \cdot 600 \cdot 3 = 3600 \text{ mm}^2 \text{ (průřezová plocha svarového obrazce)}$$

Složky napětí působící ve svaru:

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_{z,přísl.}}{A_w} = \frac{6,89 \cdot 10^3}{3600} = 1,91 \text{ MPa}$$

$$\sigma_w = \frac{V_{z,přísl.} \cdot e}{2 \cdot \frac{1}{6} \cdot a \cdot l^2} + \frac{N_{Ed,oblouk}}{A_w} = \frac{6,89 \cdot 240}{2 \cdot \frac{1}{6} \cdot 3 \cdot 600^2} + \frac{405,85}{3600} = 117,33 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma_w}{\sqrt{2}} = \frac{117,33}{\sqrt{2}} = 82,96 \text{ MPa}$$

**Posouzení svaru:**

$$\sigma_{\perp} = 82,96 \text{ MPa} < \frac{0,9 \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 510}{1,25} = 367,2 \text{ MPa}$$

**VYHOVUJE**

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}$$

$$\sqrt{82,96^2 + 3 \cdot (82,96 + 1,61^2)} \leq \frac{510}{0,9 \cdot 1,25}$$

$$166,0 \text{ MPa} < 453,3 \text{ MPa}$$

**VYHOVUJE**

### *Návrh a posouzení svorníkového spoje s hlavním nosníkem*

$$d = 20 \text{ mm}$$

$$d_0 = 22 \text{ mm}$$

$$n_1 = 3 \text{ ks (počet svorníků v 1 řadě)}$$

$$n_{řad} = 3 \text{ (počet řad svorníků)}$$

$$n = 3 \cdot 3 = 9 \text{ ks (celkový počet svorníků)}$$

$$f_{ub} = 800 \text{ MPa}$$

Osové vzdálenosti svorníků:

$$\alpha = 0^\circ \text{ (úhel zatížení vzhledem k vláknům)}$$

$$a_1 = (4 + \cos \alpha) \cdot d = 100 \text{ mm} \quad \text{-navrženo } 150 \text{ mm}$$

$$a_2 = 4 \cdot d = 80 \text{ mm} \quad \text{-navrženo } 150 \text{ mm}$$

$$a_{3,t} = \max [7 \cdot d, 80] = 140 \text{ mm} \quad \text{-navrženo } 150 \text{ mm}$$

$$a_{4,t} = \max [(2 + 2 \cdot \sin \alpha) \cdot d; 3 \cdot d] = 60 \text{ mm} \quad \text{-navrženo } 150 \text{ mm}$$

Charakteristická pevnost v otlacení ve dřevěném prvku – předvrtávané otvory:

$$f_{h,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot 20) \cdot 380 = 24,93 \text{ MPa}$$

$$f_{h,\alpha,k} = f_{h,0,k} = 24,93 \text{ MPa}$$

Charakteristický plastický moment únosnosti svorníku:

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{ub} \cdot d^{2,6} = 0,3 \cdot 800 \cdot 20^{2,6} = 579281 \text{ Nmm}$$

Charakteristická únosnost jednoho svorníku:

$$t_1 = 80 \text{ mm}$$

$$F_{v,Rk} = \left( \frac{f_{h,\alpha,k} \cdot t_1 \cdot d}{f_{h,\alpha,k} \cdot t_1 \cdot d \cdot \left[ \sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,\alpha,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right]} \right) \cdot \left( \frac{2,3 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d}}{2,3 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d}} \right)$$

$$F_{v,Rk} = \left( \frac{24,93 \cdot 80 \cdot 20}{2,3 \cdot \sqrt{579281 \cdot 24,93 \cdot 20}} \cdot \left[ \sqrt{2 + \frac{4 \cdot 579281}{24,93 \cdot 20 \cdot 80^2}} - 1 \right] \right)$$

$$F_{v,Rk} = \min \begin{pmatrix} 39,89 \text{ kN} \\ 25,97 \text{ kN} \\ 39,09 \text{ kN} \end{pmatrix} = 25,97 \text{ kN}$$

Návrhová únosnost jednoho svorníku v 1 střihu:

$$F_{v,Rd} = k_{mod} \cdot \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_M} = 0,7 \cdot \frac{25,97}{1,30} = 13,98 \text{ kN}$$

Návrhová únosnost jednoho svorníku pro 4 střihy:

$$F_{v,Rd} = 4 \cdot 13,98 = 55,93 \text{ kN}$$

Účinný počet svorníků v 1 řadě rovnoběžně s vlákny:

$$n_{ef} = \min \left\{ n_{0,9} \cdot \sqrt[4]{\frac{a_1}{13d}} \right\} = \min \left\{ 3_{0,9} \cdot \sqrt[4]{\frac{150}{13 \cdot 20}} \right\} = \min \left\{ \frac{3}{2,3} \right\} = 2,3$$

Síla působící na 1 řadu svorníků:

$$F_{v,Ed} = \frac{N_{Ed,hl.nosník}}{n_{řad}} = \frac{289,68}{3} = 96,56 \text{ kN}$$

**Posouzení únosnosti svorníků pro maximální smykové namáhání:**

$$F_{v,Ed} = 96,56 \text{ kN} < n_{ef} \cdot F_{v,Rd} = 2,3 \cdot 55,93 = 131,03 \text{ kN} \quad \text{VYHOVUJE}$$

### *Posouzení únosnosti styčnickového plechu hlavního nosníku v otláčení*

Vložený plech – ocel S355:

$$tl. = 10 \text{ mm}$$

$$f_y = 355 \text{ MPa}$$

$$f_u = 510 \text{ MPa}$$

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{800}{510} = 1,57 \\ \frac{e_1}{3 \cdot d_0} = \frac{50}{3 \cdot 22} = 0,76 \\ \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - 0,25 = \frac{150}{3 \cdot 22} - 0,25 = 2,02 \end{array} \right\} = 0,76$$

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \cdot \frac{150}{22} - 1,7 = 17,39 \\ 1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 \cdot \frac{150}{22} - 1,7 = 7,85 \end{array} \right\} = 2,5$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t_p}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,76 \cdot 510 \cdot 20 \cdot 10}{1,25} = 154,5 \text{ kN}$$

Síla působící na 1 svorník:

$$F_{v,Ed} = \frac{N_{Ed,hl.nosník}}{n_{řad} \cdot n_{ef}} = \frac{289,68}{3 \cdot 2,3} = 41,22 \text{ kN}$$

**Posouzení styčnickového plechu na otláčení:**

$$F_{v,Ed} = 41,22 \text{ kN} < F_{b,Rd} = 154,5 \text{ kN}$$

**VYHOVUJE**

*Posouzení únosnosti oslabeného plechu v tahu*

$$t_p = 10 \text{ mm}$$

$$h = 600 \text{ mm}$$

$$d_0 = 22 \text{ mm}$$

$$n_{řad} = 3 \text{ (počet řad svorníků)}$$

Plocha oslabená otvory:

$$A_{osl.} = t_p \cdot (h - n_{řad} \cdot d_0) = 10 \cdot (600 - 3 \cdot 22) = 5340 \text{ mm}^2$$

$$\sigma = \frac{N_{Ed,hl.nosník}}{A_{osl.}} = \frac{289,68 \cdot 10^3}{5340} = 54,25 \text{ MPa}$$

Posudek tahového napětí:

$$\sigma = 54,3 \text{ MPa} < f_y = 355,0 \text{ MPa}$$

**VYHOVUJE**

### Návrh a posouzení čepového ložiska

Čep - Třída pevnosti 4.6:

$$f_{y,p} = 240 \text{ MPa}$$

$$f_{u,p} = 400 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

$$\gamma_{M0} = 1,00$$

Plech - ocel S355:

$$f_y = 355 \text{ MPa}$$

$$f_u = 510 \text{ MPa}$$

Výsledná síla zatěžující čep:

$$F_{v,Ed} = \sqrt{R_x^2 + R_z^2} = \sqrt{35,67^2 + 262,24^2} = 264,65 \text{ kN}$$

Tloušťka čepového plechu:

$$t_{p,1} \geq 0,7 \cdot \sqrt{\frac{F_{v,Ed} \cdot \gamma_{M0}}{355}} = 0,7 \cdot \sqrt{\frac{264,45 \cdot 1,0}{355}} = 19,1 \text{ mm} \quad \text{-navrženo 25 mm}$$

Návrh geometrie plechu a čepu:

$$d_0 \leq 2,5 \cdot t_{p,1} = 2,5 \cdot 25 = 62,5 \text{ mm} \quad \text{-navrženo 60 mm}$$

$$a \geq \frac{F_{v,Ed} \cdot \gamma_{M0}}{2 \cdot t \cdot f_y} + \frac{2 \cdot d_0}{3} = \frac{264,65 \cdot 1,0}{2 \cdot 25 \cdot 355} + \frac{2 \cdot 60}{3} = 40,0 \text{ mm} \quad \text{-navrženo 50 mm}$$

$$c \geq \frac{F_{v,Ed} \cdot \gamma_{M0}}{2 \cdot t \cdot f_y} + \frac{d_0}{3} = \frac{264,65 \cdot 1,0}{2 \cdot 25 \cdot 355} + \frac{60}{3} = 20,0 \text{ mm} \quad \text{-navrženo 50 mm}$$

Plocha průřezu čepu:

$$A_{\check{c}ep} = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 60^2 = 2827 \text{ mm}^2$$

Únosnost čepu ve střihu:

$$F_{v,Rd} = 0,6 \cdot \frac{f_{up} \cdot A_{\check{c}ep}}{\gamma_{M2}} = 0,6 \cdot \frac{400 \cdot 2827^2}{1,25} = 542,87 \text{ kN}$$

Posouzení čepu na namáhání střihem:

$$F_{v,Ed} = 264,65 \text{ kN} < F_{v,Rd} = 542,87 \text{ kN}$$

**VYHOVUJE**

Únosnost čepu a plechu v otlačení:

$$F_{b,Rd} = 1,5 \cdot t_1 \cdot d \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 1,5 \cdot 25 \cdot 60 \cdot \frac{240}{1,0} = 540,00 \text{ kN}$$

Posouzení čepu a plechu v otlačení:

$$F_{v,Ed} = 264,65 \text{ kN} < F_{b,Rd} = 510,00 \text{ kN}$$

**VYHOVUJE**

Únosnost čepu v ohybu:

$$W_0 = \frac{\pi \cdot d^3}{32} = \frac{\pi \cdot 60^3}{32} = 21206 \text{ mm}^3$$

$t_2 = 15 \text{ mm}$  (tloušťka krajních plechů)

$t_3 = 2 \text{ mm}$  (vzdálenost mezi plechy)

$$M_{Ed} = \frac{F_{v,Ed}}{8} \cdot (t_1 + 2 \cdot t_2 + 4 \cdot t_3) = \frac{264,65}{8} \cdot (25 + 2 \cdot 15 + 4 \cdot 2) = 2,08 \text{ kNm}$$

$$M_{Rd} = 1,5 \cdot W_0 \cdot \frac{f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = 1,5 \cdot 21206 \cdot \frac{240}{1,00} = 7,63 \text{ kNm}$$

Posouzení čepu na ohyb a na kombinaci ohybu a stříhu:

$$M_{Ed} = 2,08 \text{ kNm} < M_{Rd} = 7,63 \text{ kNm}$$

**VYHOVUJE**

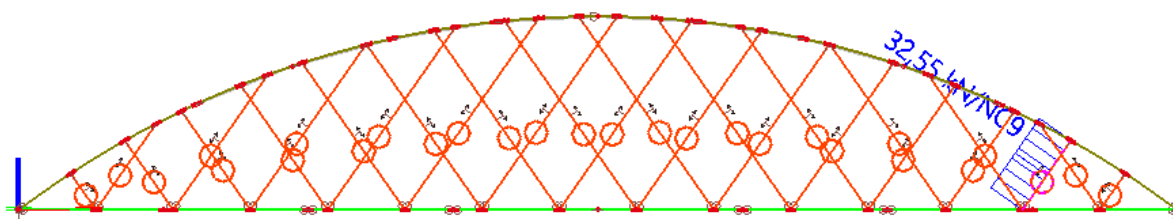
$$\left(\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}}\right)^2 = \left(\frac{2,08}{7,63}\right)^2 + \left(\frac{264,65}{542,87}\right)^2 \leq 1$$

$$0,31 < 1$$

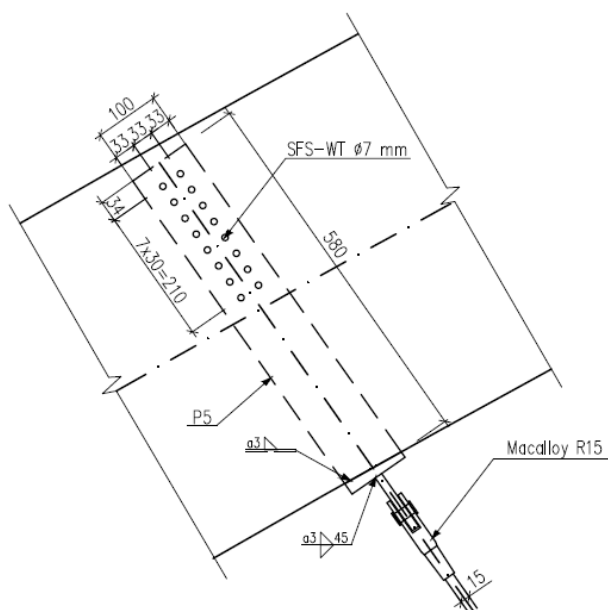
**VYHOVUJE**

### 7.3. Přípoj závěsu k oblouku

Tento přípoj byl proveden za pomoci vloženého styčnickového plechu P5 a samovrtných kolíků SFS-WT  $\phi 7,0 \times 233 \text{ mm}$ . Dimenzován byl na maximální normálovou sílu v táhle.



Obrázek 42: Označení táhla s  $N_{\max}$



Obrázek 43: Schéma přípoje táhla k oblouku

#### *Vnitřní síly působící ve spoji*

$$N_{Ed} = 32,55 \text{ kN} \quad \text{NC9} (1,35 \cdot \text{LC1} + 1,35 \cdot \text{LC2} + 1,35 \cdot \text{LC3} + 0,45 \cdot \text{LC9})$$

### Návrh a posouzení kolíkového spoje

$$d = 7 \text{ mm}$$

$$n_1 = 8 \text{ ks (počet kolíků v 1 řadě)}$$

$$n_{\text{řad}} = 2 \text{ (počet řad kolíků)}$$

$$n = 8 \cdot 2 = 16 \text{ ks (celkový počet kolíků)}$$

$$f_{ub} = 550 \text{ MPa}$$

Osové vzdálenosti svorníků:

$$\alpha = 90^\circ \text{ (úhel zatížení vzhledem k vláknům)}$$

$$a_1 = (3 + 2 \cdot |\cos \alpha|) \cdot d = 21 \text{ mm} \quad \text{-navrženo } 33 \text{ mm}$$

$$a_2 = 3 \cdot d = 21 \text{ mm} \quad \text{-navrženo } 30 \text{ mm}$$

$$a_{4,t} = \max [(2 + 2 \cdot \sin \alpha) \cdot d; 3 \cdot d] = 28 \text{ mm} \quad \text{-navrženo } 330 \text{ mm}$$

$$a_{4,c} = 3 \cdot d = 21 \text{ mm} \quad \text{-navrženo } 60 \text{ mm}$$

Zatížení na jeden svorník:

$$F_{v,Ed} = \frac{N_{Ed}}{n} = \frac{32,55}{16} = 2,03 \text{ kN}$$

Charakteristická pevnost v otláčení ve dřevěném prvku – předvrtávané otvory:

$$f_{h,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot 7) \cdot 380 = 28,98 \text{ MPa}$$

$$k_{90} = 1,35 + 0,015 \cdot d = 1,35 + 0,015 \cdot 7 = 1,46$$

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} = \frac{28,98}{1,46 \cdot \sin^2 90^\circ + \cos^2 90^\circ} = 19,92 \text{ MPa}$$

Charakteristický plastický moment únosnosti svorníku:

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{ub} \cdot d^{2,6} = 0,3 \cdot 400 \cdot 7^{2,6} = 25986 \text{ Nmm}$$

Charakteristická únosnost jednoho svorníku:

$$t_1 = 90,5 \text{ mm (hloubka vniku kolíku za ocelovým plechem)}$$



$$F_{v,Rk} = \left( \frac{f_{h,\alpha,k} \cdot t_1 \cdot d}{2,3 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d}} \cdot \left[ \sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,\alpha,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right] \right)$$

$$F_{v,Rk} = \left( \frac{19,92 \cdot 90,5 \cdot 7}{2,3 \cdot \sqrt{25986 \cdot 19,92 \cdot 7}} \cdot \left[ \sqrt{2 + \frac{4 \cdot 25986}{19,92 \cdot 7 \cdot 90,5^2}} - 1 \right] \right)$$

$$F_{v,Rk} = \min \begin{pmatrix} 12,62 \text{ kN} \\ 5,63 \text{ kN} \\ 4,38 \text{ kN} \end{pmatrix} = 4,38 \text{ kN}$$

Návrhová únosnost jednoho svorníku:

$$F_{v,Rd} = k_{mod} \cdot \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_M} = 0,7 \cdot \frac{4,38}{1,30} = 2,36 \text{ kN}$$

**Posouzení únosnosti svorníků pro maximální smykové namáhání:**

$$F_{v,Ed} = 2,03 \text{ kN} < F_{v,Rd} = 2,36 \text{ kN}$$

**VYHOVUJE**

### *Posouzení únosnosti styčnickového plechu v otláčení*

Vložený plech – ocel S355:

$$tl. = 5 \text{ mm}$$

$$f_y = 355 \text{ MPa}$$

$$f_u = 510 \text{ MPa}$$

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{550}{510} = 1,08 \\ \frac{e_1}{3 \cdot d_0} = \frac{34}{3 \cdot 7} = 1,62 \\ \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - 0,25 = \frac{30}{3 \cdot 7} - 0,25 = 1,18 \end{array} \right\} = 1,0$$

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \cdot \frac{33}{7} - 1,7 = 11,5 \\ 1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 \cdot \frac{33}{7} - 1,7 = 4,9 \end{array} \right\} = 2,5$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t_p}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 1,0 \cdot 510 \cdot 7 \cdot 5}{1,25} = 35,7 \text{ kN}$$

**Posouzení styčnickového plechu na otláčení:**

$$F_{v,Ed} = 32,55 \text{ kN} < F_{b,Rd} = 35,7 \text{ kN}$$

**VYHOVUJE**

*Posouzení únosnosti oslabeného plechu v tahu*

$$t_p = 5 \text{ mm}$$

$$h = 100 \text{ mm}$$

$$d_0 = 7 \text{ mm}$$

$$n_{řad} = 2 \text{ (počet řad kolíků)}$$

Plocha oslabená otvory:

$$A_{osl.} = t_p \cdot (h - n_{řad} \cdot d_0) = 5 \cdot (100 - 2 \cdot 7) = 430 \text{ mm}^2$$

$$\sigma = \frac{N_{Ed}}{A_{osl.}} = \frac{32,55 \cdot 10^3}{430} = 75,70 \text{ MPa}$$

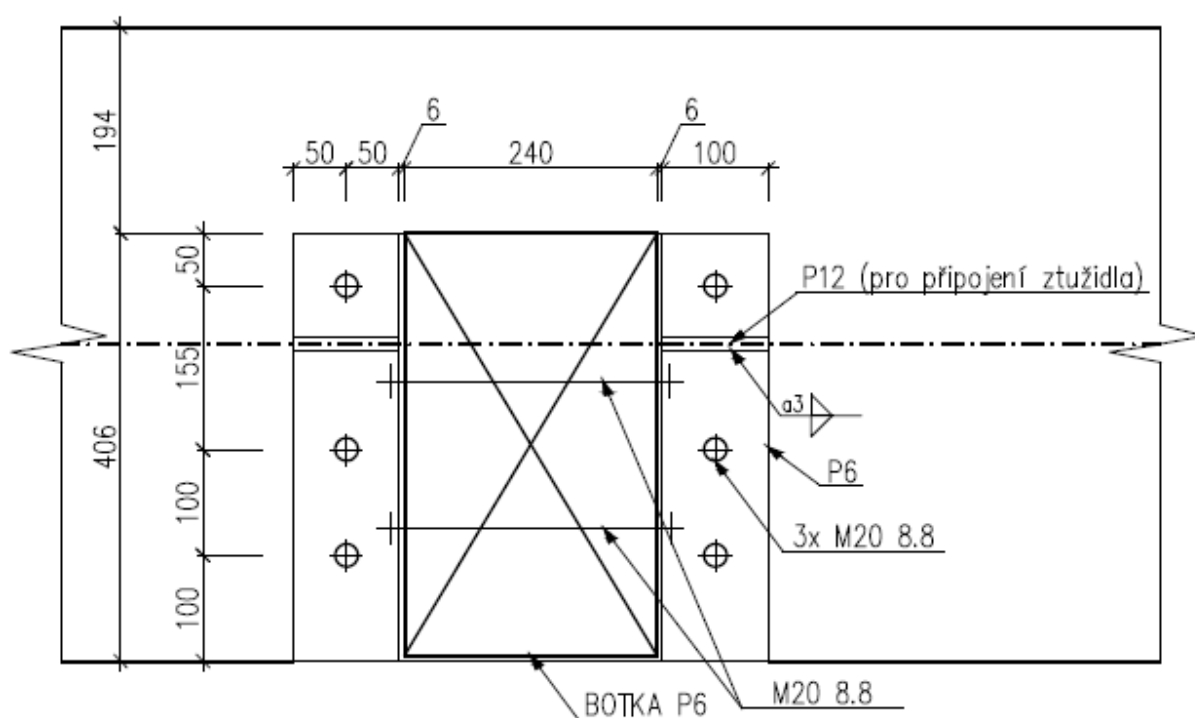
Posudek tahového napětí:

$$\sigma = 75,70 \text{ MPa} < f_y = 355,0 \text{ MPa}$$

**VYHOVUJE**

## 7.4. Spoj příčnicku a hlavního nosníku

Příčník byl připojen k hlavnímu nosníku pomocí ocelové botky z plechu tloušťky 6 mm. Délka vyložení botky byla navržena 190 mm. Jedná se o jednostřížný spoj ocel – dřevo, který je namáhán smykovou silou, na kterou byl posuzován. V úrovni vodorovné osy hlavního nosníku jsou k botce přivařeny plechy P12 pro napojení ocelových táhel, případně dřevěných hranolů jako ztužení mostovky. Rovněž byl ověřen tlak kolmo na vlákna hlavního nosníku.



Obrázek 44: Schéma spoje příčnicku a hlavního nosníku

### *Vnitřní síly působící ve spoji*

$$N_{Ed} = -20,25 \text{ kN} \quad \text{NC45 } (1,35 \cdot \text{LC1} + 1,35 \cdot \text{LC2} + 0,54 \cdot \text{LC5} + 1,50 \cdot \text{LC8})$$

$$V_{Ed} = 66,54 \text{ kN} \quad \text{NC9 } (1,35 \cdot \text{LC1} + 1,35 \cdot \text{LC2} + 1,35 \cdot \text{LC3} + 0,45 \cdot \text{LC9})$$

### *Posudek v tlaku kolmo na vlákna hlavního nosníku*

$$N_{Ed} = 20,25 \text{ kN}$$

$$A_{ef,90} = 240 \cdot 400 = 96000 \text{ mm}^2$$

Normálové napětí v tlaku kolmo na vlákna dřeva:

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{N_{Ed}}{A_{ef,90}} = \frac{20,25 \cdot 10^3}{96000} = 0,21 \text{ MPa}$$

Návrhová únosnost v tlaku kolmo na vlákna dřeva:

$$f_{c,90,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{c,90,k}}{\gamma_M} = \frac{0,7 \cdot 2,7}{1,25} = 1,51 \text{ MPa}$$

**Posouzení napětí v tlaku kolmo na vlákna dřeva:**

$$\sigma_{c,90,d} = 0,21 \text{ MPa} < f_{c,90,d} = 1,51 \text{ MPa} \quad \text{VYHOVUJE}$$

### *Návrh a posouzení svorníkového spoje*

$$d = 20 \text{ mm}$$

$$d_0 = 22 \text{ mm}$$

$$n = 6 \text{ ks}$$

$$f_{ub} = 800 \text{ MPa}$$

Osové vzdálenosti svorníků:

$$\alpha = 90^\circ \text{ (úhel zatížení vzhledem k vláknům)}$$

$$a_1 = (4 + \cos \alpha) \cdot d = 80 \text{ mm} \quad \text{-2 samostatné svislé řady}$$

$$a_2 = 4 \cdot d = 80 \text{ mm} \quad \text{-navrženo 100 mm}$$

$$a_{4,c} = 3 \cdot d = 60 \text{ mm} \quad \text{-navrženo 244 mm}$$

$$a_{4,t} = \max [(2 + 2 \cdot \sin \alpha) \cdot d; 3 \cdot d] = 80 \text{ mm} \quad \text{-navrženo 100 mm}$$

Zatížení na jeden svorník:

$$F_{v,Ed} = \frac{V_{Ed}}{n} = \frac{66,54}{6} = 11,09 \text{ kN}$$

Charakteristická pevnost v otlacení ve dřevěném prvku – předvrtávané otvory:

$$f_{h,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot 20) \cdot 380 = 24,93 \text{ MPa}$$

$$k_{90} = 1,35 + 0,015 \cdot d = 1,35 + 0,015 \cdot 20 = 1,65$$

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} = \frac{24,93}{1,65 \cdot \sin^2 90^\circ + \cos^2 90^\circ} = 15,11 \text{ MPa}$$

Charakteristický plastický moment únosnosti svorníku:

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{ub} \cdot d^{2,6} = 0,3 \cdot 400 \cdot 20^{2,6} = 579281 \text{ Nmm}$$

Charakteristická únosnost jednoho svorníku:

$$t_1 = 280 \text{ mm (tloušťka dřevěného prvku)}$$

$$0,5 \cdot d_0 = 0,5 \cdot 22 = 11 \text{ mm} > t_p = 5 \text{ mm} \Rightarrow \text{tenká deska}$$

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \frac{0,4 \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot t_1 \cdot d}{1,15 \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d}} \right\}$$

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \frac{0,4 \cdot 15,11 \cdot 280 \cdot 20}{1,15 \cdot \sqrt{579281 \cdot 15,11 \cdot 20}} \right\}$$

$$F_{v,Rk} = \min \{33,84 \text{ kN}, 21,52 \text{ kN}\} = 21,52$$

Návrhová únosnost jednoho svorníku:

$$F_{v,Rd} = k_{mod} \cdot \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_M} = 0,7 \cdot \frac{21,52}{1,30} = 11,59 \text{ kN}$$

**Posouzení únosnosti svorníků pro maximální smykové namáhání:**

$$F_{v,Ed} = 11,09 \text{ kN} < F_{v,Rd} = 11,59 \text{ kN}$$

**VYHOVUJE**

*Posouzení únosnosti styčnickového plechu v otláčení*

Čelní plech – ocel S355:

$$tl. = 6 \text{ mm}$$

$$f_y = 355 \text{ MPa}$$

$$f_u = 510 \text{ MPa}$$

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{800}{510} = 1,57 \\ \frac{e_1}{3 \cdot d_0} = \frac{50}{3 \cdot 22} = 0,76 \\ \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - 0,25 = \frac{100}{3 \cdot 22} - 0,25 = 1,27 \end{array} \right\} = 0,76$$

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \cdot \frac{50}{22} - 1,7 = 4,66 \\ 1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 \cdot \frac{100}{22} - 1,7 = 4,66 \end{array} \right\} = 2,5$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t_p}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,76 \cdot 510 \cdot 20 \cdot 6}{1,25} = 92,73 \text{ kN}$$

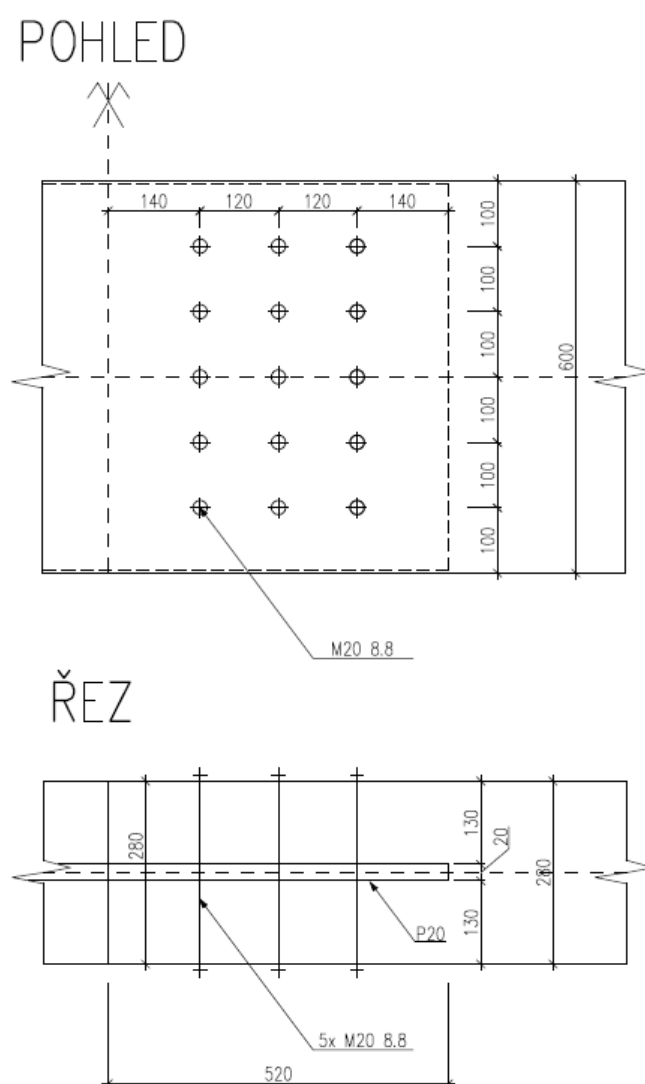
**Posouzení styčnickového plechu na otláčení:**

$$F_{v,Ed} = 11,09 \text{ kN} < F_{b,Rd} = 92,73 \text{ kN}$$

**VYHOVUJE**

## 7.5. Montážní spoj hlavního nosníku

Celková délka hlavního nosníku je 30 m, a tedy z důvodu přepravních limitů musí být prvek rozdělen na tři samostatné části. Rozdělení nosníku bylo provedeno 9 m od obou konců, střední část pak měří 12 m. Montážní spoj byl navržen ze svorníků M20 8.8 a vloženého plechu P20 jako dvojstřížný, typu ocel – dřevo. Posudek byl proveden na extrémní tahové namáhání v místě spoje.



Obrázek 45: Schéma montážního spoje hlavního nosníku

### *Vnitřní síly působící ve spoji*

$$N_{Ed} = 302,70 \text{ kN} \quad \text{NC9 } (1,35 \cdot \text{LC1} + 1,35 \cdot \text{LC2} + 1,35 \cdot \text{LC3} + 0,45 \cdot \text{LC9})$$

$$V_{přisl.} = 6,70 \text{ kN}$$

### *Návrh a posouzení svorníkového spoje*

$$d = 20 \text{ mm}$$

$$d_0 = 22 \text{ mm}$$

$$n_1 = 3 \text{ ks (počet svorníků v 1 řadě)}$$

$$n_{řad} = 5 \text{ (počet řad svorníků)}$$

$$n = 3 \cdot 5 = 15 \text{ ks (celkový počet svorníků)}$$

$$f_{ub} = 800 \text{ MPa}$$

Osově vzdálenosti svorníků:

$$\alpha = 0^\circ \text{ (úhel zatížení vzhledem k vláknům)}$$

$$a_1 = (4 + \cos \alpha) \cdot d = 100 \text{ mm} \quad \text{-navrženo } 120 \text{ mm}$$

$$a_2 = 4 \cdot d = 80 \text{ mm} \quad \text{-navrženo } 100 \text{ mm}$$

$$a_{3,t} = \max [7 \cdot d; 80] = 140 \text{ mm} \quad \text{-navrženo } 140 \text{ mm}$$

$$a_{4,c} = 3 \cdot d = 60 \text{ mm} \quad \text{-navrženo } 100 \text{ mm}$$

Charakteristická pevnost v otlacení ve dřevěném prvku – předvrtávané otvory:

$$f_{h,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot 20) \cdot 380 = 24,93 \text{ MPa}$$

$$f_{h,\alpha,k} = f_{h,0,k} = 24,93 \text{ MPa}$$

Charakteristický plastický moment únosnosti svorníku:

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{ub} \cdot d^{2,6} = 0,3 \cdot 800 \cdot 20^{2,6} = 579281 \text{ Nmm}$$

Charakteristická únosnost jednoho svorníku:

$$t_1 = \frac{(b-t_p)}{2} = \frac{(280-20)}{2} = 130 \text{ mm}$$



$$F_{v,Rk} = \left( \begin{array}{c} f_{h,\alpha,k} \cdot t_1 \cdot d \\ f_{h,\alpha,k} \cdot t_1 \cdot d \cdot \left[ \sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,\alpha,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right] \\ 2,3 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d} \end{array} \right)$$

$$F_{v,Rk} = \left( \begin{array}{c} 24,93 \cdot 130 \cdot 20 \\ 24,93 \cdot 130 \cdot 20 \cdot \left[ \sqrt{2 + \frac{4 \cdot 579281}{24,93 \cdot 20 \cdot 130^2}} - 1 \right] \\ 2,3 \cdot \sqrt{579281 \cdot 24,93 \cdot 20} \end{array} \right)$$

$$F_{v,Rk} = \min \left( \begin{array}{c} 64,81 \text{ kN} \\ 32,95 \text{ kN} \\ 39,09 \text{ kN} \end{array} \right) = 32,95 \text{ kN}$$

Návrhová únosnost jednoho svorníku v 1 střihu:

$$F_{v,Rd} = k_{mod} \cdot \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_M} = 0,7 \cdot \frac{32,95}{1,30} = 17,74 \text{ kN}$$

Návrhová únosnost jednoho svorníku pro 2 střihy:

$$F_{v,Rd} = 2 \cdot 17,74 = 35,48 \text{ kN}$$

Účinný počet svorníků v 1 řadě rovnoběžně s vlákny:

$$n_{ef} = \min \left\{ n^{0,9} \cdot \sqrt[4]{\frac{a_1}{13d}} \right\} = \min \left\{ 3^{0,9} \cdot \sqrt[4]{\frac{120}{13 \cdot 20}} \right\} = \min \left\{ \frac{3}{2,2} \right\} = 2,2$$

Síla působící na 1 řadu svorníků:

$$F_{v,Ed} = \frac{N_{Ed}}{n_{rad}} = \frac{302,70}{5} = 60,54 \text{ kN}$$

**Posouzení únosnosti 1 řady svorníků pro maximální smykové namáhání:**

$$F_{v,Ed} = 60,54 \text{ kN} < n_{ef} \cdot F_{v,Rd} = 2,2 \cdot 35,48 = 78,60 \text{ kN} \quad \text{VYHOVUJE}$$

Při posouzení byla zanedbána smyková síla  $V_{přísl.} = 6,70 \text{ kN}$ . Přípoj však disponuje rezervou únosnosti 20 %, a proto není zapotřebí další posouzení.

### *Posouzení únosnosti styčnickového plechu v otlačení*

Vložený plech – ocel S355:

$$t_l = 20 \text{ mm}$$

$$f_y = 355 \text{ MPa}$$

$$f_u = 510 \text{ MPa}$$

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,00 \\ \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{800}{510} = 1,57 \\ \frac{e_1}{3 \cdot d_0} = \frac{140}{3 \cdot 22} = 2,12 \\ \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - 0,25 = \frac{120}{3 \cdot 22} - 0,25 = 1,57 \end{array} \right\} = 1,00$$

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,5 \\ 2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \cdot \frac{100}{22} - 1,7 = 11,03 \\ 1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 \cdot \frac{100}{22} - 1,7 = 4,66 \end{array} \right\} = 2,5$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t_p}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 1,0 \cdot 510 \cdot 20 \cdot 25}{1,25} = 408,00 \text{ kN}$$

**Posouzení styčnickového plechu na otlačení:**

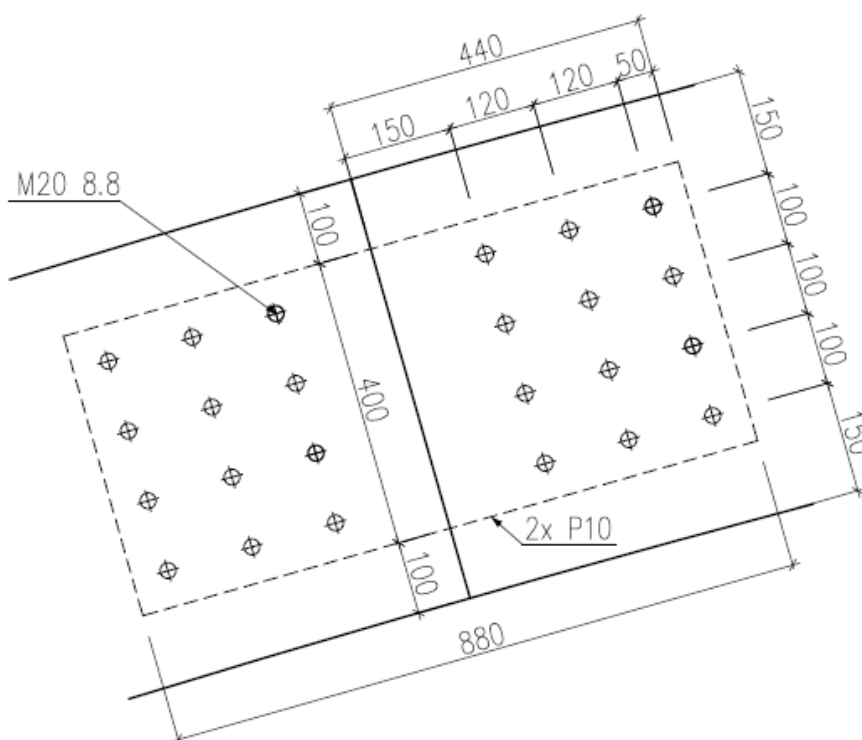
$$F_{v,Ed} = 20,18 \text{ kN} < F_{b,Rd} = 408,00 \text{ kN}$$

**VYHOVUJE**

## 7.6. Montážní spoj oblouku

Umístěním kloubu do vrcholu oblouku byl nejdelší prvek konstrukce rozdělen na 2 části délky 16,09 m. Takto dlouhý nosník by ovšem bylo nutné dopravit na stavbu pomocí tahačů s návěsem pro nadměrný náklad. Tento způsob dopravy má jasné ekonomické i časové nevýhody. Náklady na veškerá nutná povolení se samotnými náklady dopravce se většinou pohybují v řádu desítek tisíc Kč. Z hlediska plánování montáže by bylo potřeba počítat s časovou rezervou v řádu dnů až týdnů. Z výše zmíněných důvodů byl tedy navržen montážní styk, který dělí  $\frac{1}{2}$  oblouku na části o délkách 9,05 m a 7,04 m. Umístění spoje je popsáno ve výkresové dokumentaci.

Montážní spoj je zatěžován především tlakovou silou. Maximální ohybový moment i posouvající síla mají zanedbatelné hodnoty. Přenos tlakové síly byl uvažován kontaktem průřezových ploch obloukového nosníku. Navržený svorníkový spoj (12× M20 8.8) se dvěma vložnými plechy P10 byl posuzován jako čtyřstřížný spoj ocel - dřevo. Přestože byl uvažován přenos tlaku kontaktem, spoj byl dimenzován na maximální normálovou sílu. S účinky ohybového momentu a posouvající síly nebylo ve výpočtu počítáno.



Obrázek 46: Schéma montážního spoje oblouku

### *Vnitřní síly působící ve spoji*

$$N_{Ed} = -411,34 \text{ kN} \quad \text{NC9 } (1,35 \cdot \text{LC1} + 1,35 \cdot \text{LC2} + 1,35 \cdot \text{LC3} + 0,45 \cdot \text{LC9})$$

$$V_{z,přisl.} = 0,00 \text{ kN}$$

$$M_{y,přisl.} = 2,27 \text{ kN}$$

### *Návrh a posouzení svorníkového spoje*

$$d = 20 \text{ mm}$$

$$d_0 = 22 \text{ mm}$$

$$n_1 = 3 \text{ ks (počet svorníků v 1 řadě)}$$

$$n_{řad} = 4 \text{ (počet řad svorníků)}$$

$$n = 3 \cdot 4 = 12 \text{ ks (celkový počet svorníků)}$$

$$f_{ub} = 800 \text{ MPa}$$

Osové vzdálenosti svorníků:

$$\alpha = 0^\circ \text{ (úhel zatížení vzhledem k vláknům)}$$

$$a_1 = (4 + \cos \alpha) \cdot d = 100 \text{ mm} \quad \text{-navrženo } 120 \text{ mm}$$

$$a_2 = 4 \cdot d = 80 \text{ mm} \quad \text{-navrženo } 100 \text{ mm}$$

$$a_{3,t} = \max [7 \cdot d; 80] = 140 \text{ mm} \quad \text{-navrženo } 150 \text{ mm}$$

$$a_{4,c} = 3 \cdot d = 60 \text{ mm} \quad \text{-navrženo } 150 \text{ mm}$$

Charakteristická pevnost v otláčení ve dřevěném prvku – předvrtávané otvory:

$$f_{h,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot 20) \cdot 380 = 24,93 \text{ MPa}$$

$$f_{h,\alpha,k} = f_{h,0,k} = 24,93 \text{ MPa}$$

Charakteristický plastický moment únosnosti svorníku:

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{ub} \cdot d^{2,6} = 0,3 \cdot 800 \cdot 20^{2,6} = 579281 \text{ Nmm}$$

Charakteristická únosnost jednoho svorníku:

$$t_1 = 80 \text{ mm}$$

$$F_{v,Rk} = \left( \begin{array}{c} f_{h,\alpha,k} \cdot t_1 \cdot d \\ f_{h,\alpha,k} \cdot t_1 \cdot d \cdot \left[ \sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,\alpha,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right] \\ 2,3 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d} \end{array} \right)$$

$$F_{v,Rk} = \left( \begin{array}{c} 24,93 \cdot 80 \cdot 20 \\ 24,93 \cdot 80 \cdot 20 \cdot \left[ \sqrt{2 + \frac{4 \cdot 579281}{24,93 \cdot 20 \cdot 80^2}} - 1 \right] \\ 2,3 \cdot \sqrt{579281 \cdot 24,93 \cdot 20} \end{array} \right)$$

$$F_{v,Rk} = \min \left( \begin{array}{c} 39,89 \text{ kN} \\ 25,97 \text{ kN} \\ 39,09 \text{ kN} \end{array} \right) = 25,97 \text{ kN}$$

Návrhová únosnost jednoho svorníku v 1 střihu:

$$F_{v,Rd} = k_{mod} \cdot \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_M} = 0,7 \cdot \frac{25,97}{1,30} = 13,98 \text{ kN}$$

Návrhová únosnost jednoho svorníku pro 4 střihy:

$$F_{v,Rd} = 4 \cdot 13,98 = 55,93 \text{ kN}$$

Účinný počet svorníků v 1 řadě rovnoběžně s vlákny:

$$n_{ef} = \min \left\{ n^{0,9 \cdot \sqrt[4]{\frac{a_1}{13d}}} \right\} = \min \left\{ 3^{0,9 \cdot \sqrt[4]{\frac{120}{13 \cdot 20}}} \right\} = \min \left\{ \frac{3}{2,2} \right\} = 2,2$$

Síla působící na 1 řadu svorníků:

$$F_{v,Ed} = \frac{N_{Ed,oblouk}}{n_{rad}} = \frac{405,85}{4} = 101,46 \text{ kN}$$

**Posouzení únosnosti svorníků pro maximální smykové namáhání:**

$$F_{v,Ed} = 101,46 \text{ kN} < n_{ef} \cdot F_{v,Rd} = 2,2 \cdot 55,93 = 123,92 \text{ kN} \quad \text{VYHOVUJE}$$

*Posouzení únosnosti styčnickového plechu oblouku v otláčení*

Vložený plech – ocel S355:

$$t_l = 10 \text{ mm}$$

$$f_y = 355 \text{ MPa}$$

$$f_u = 510 \text{ MPa}$$

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{800}{510} = 1,57 \\ \frac{e_1}{3 \cdot d_0} = \frac{50}{3 \cdot 22} = 0,76 \\ \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - 0,25 = \frac{120}{3 \cdot 22} - 0,25 = 1,57 \end{array} \right\} = 0,76$$

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,5 \\ 2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \cdot \frac{50}{22} - 1,7 = 4,66 \\ 1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 \cdot \frac{100}{22} - 1,7 = 4,66 \end{array} \right\} = 2,5$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t_p}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,76 \cdot 510 \cdot 20 \cdot 10}{1,25} = 154,5 \text{ kN}$$

Síla působící na 1 svorník:

$$F_{v,Ed} = \frac{N_{Ed}}{n_{rad} \cdot n_{ef}} = \frac{411,34}{4 \cdot 2,2} = 46,42 \text{ kN}$$

**Posouzení styčnickového plechu na otláčení:**

$$F_{v,Ed} = 46,4 \text{ kN} < F_{b,Rd} = 154,5 \text{ kN}$$

**VYHOVUJE**

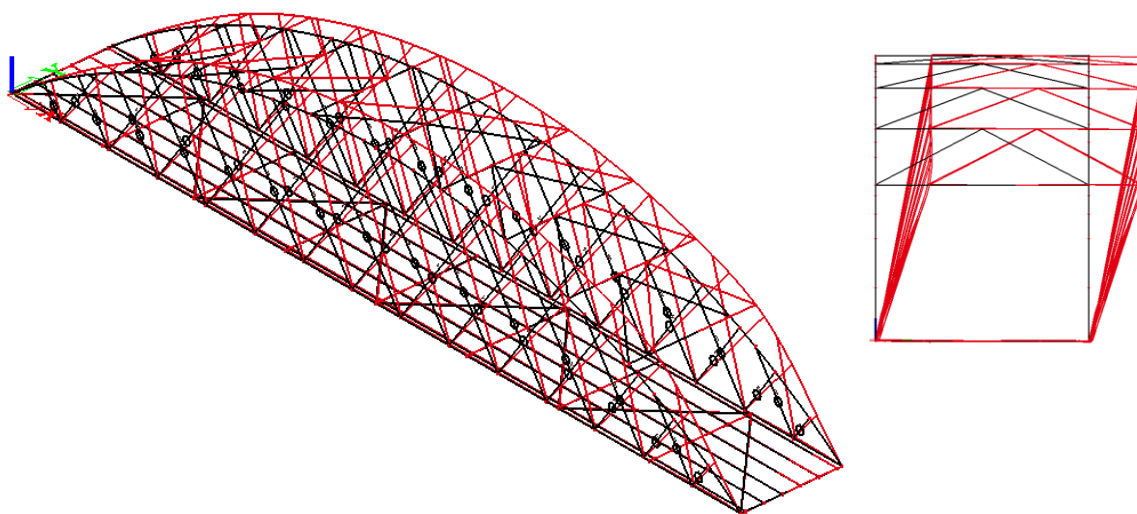
## 8. MODÁLNÍ ANALÝZA

Častým nepříznivým jevem vyskytujícím se u konstrukcí lávek je kmitání konstrukce. Důvodem těchto problémů je většinou velká štíhlost konstrukce k její délce. Hlavními příčinami výskytu kmitání u lávek je chůze lidí. Nepřekročí-li vlastní frekvence konstrukce minimální mezní hodnoty uvedené v ČSN EN 1990/A1 [1], není zapotřebí ověřovat kritéria pohody chodců.

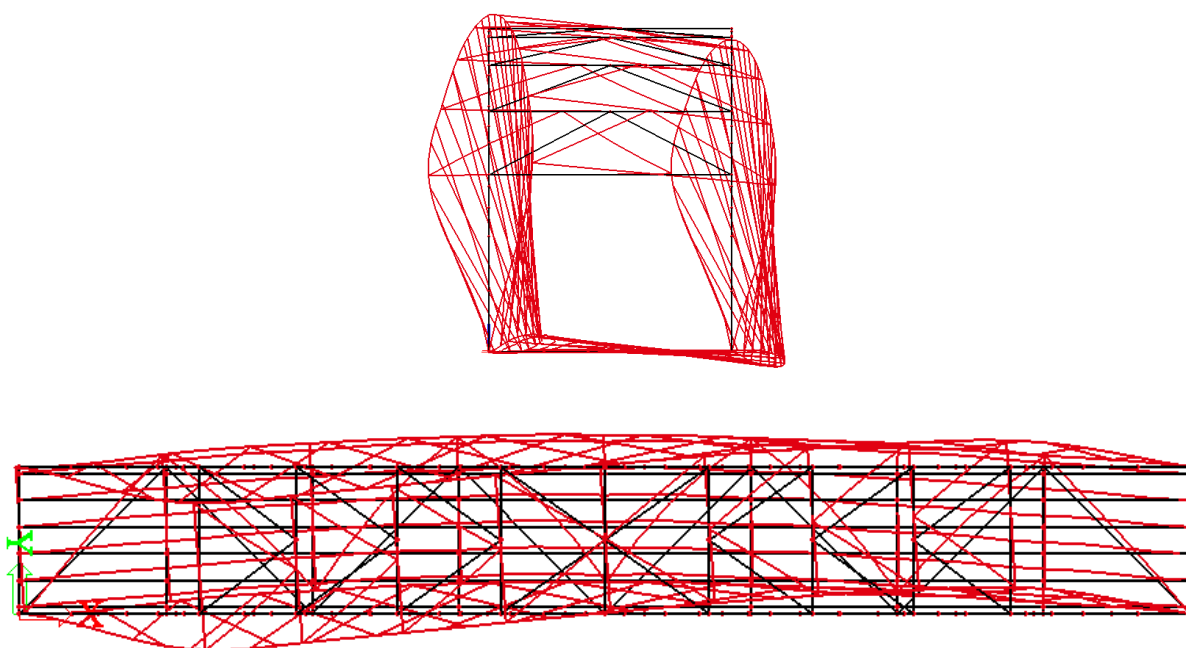
Vlastní frekvence konstrukce byly zjišťovány pomocí modální analýzy v programu Scia Engineer [14]. Skupiny hmot byly v programu vytvořeny svázáním se zatěžovacími stavy vlastní tíhy (LC1) a stálého zatížení (LC2). Následně byla vytvořena kombinace skupin hmot a spuštěna modální analýza. Zjišťovány byly první 4 vlastní tvary vybočení lávky, které si je možné prohlédnout na obrázcích 48 - 50.

N	f [Hz]	omega [1/s]	omega <sup>2</sup> [1/s <sup>2</sup> ]	T [s]
<i>*Studentská verze<sup>1</sup> *Studentská verze<sup>1</sup> *Studentská verze<sup>1</sup> *Studentská verze<sup>1</sup> *Studentská verze<sup>1</sup></i>				
<b>Kombinace hmot : CM1</b>				
1	2,95	18,53	343,43	0,34
2	9,90	62,18	3865,82	0,10
3	11,25	70,71	4999,23	0,09
4	11,93	74,95	5617,72	0,08

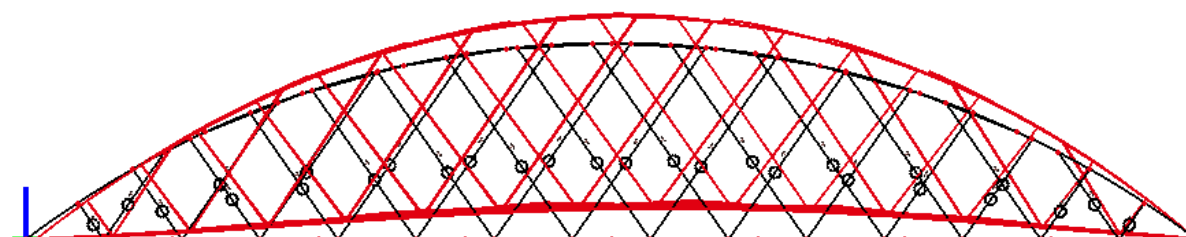
Obrázek 47: Výstup ze Scia Engineer



Obrázek 48: Vlastní tvar vodorovného kmitání  $f = 2,95 \text{ Hz}$



Obrázek 49: Vlastní tvar kroutivého kmitání  $f = 9,90 \text{ Hz}$



Obrázek 50: Vlastní tvar svislého kmitání  $f = 11,93 \text{ Hz}$

Závěrem výpočtu bylo porovnání dosažených výsledků s normovými hodnotami minimálních vlastních frekvencí. Z tabulky 12 jasně vyplývá, že není zapotřebí další posuzování nepohody chodců od kmitání lávky.

Směr kmitání	Frekvence $f [\text{Hz}]$	Minimální frekvence $f_{\min} [\text{Hz}]$	Nutnost ověření pohody chodců
vodorovné	2,95	2,50	NE
kroutivé	9,90	2,50	NE
svislé	11,93	5,00	NE

Tabulka 12: Porovnání frekvencí



## 8. MONTÁŽ LÁVKY

Jak již bylo popsáno ve výpočtech montážních spojů, všechny prvky konstrukce lávky je možné dopravit na místo určení pomocí standardní kamionové dopravy. Nejdelšími přepravovanými prvky jsou střední části hlavních nosníků délky 12 m. Na stavenišť budou dovezeny všechny prvky samostatně a montáž bude probíhat podél koryta řeky Olše.

Celková hmotnost lávky je přibližně 15 t. Při montáži budou zapotřebí dva mobilní jeřáby s nosností 35 t, aby mohly být najednou vzpřímeny oba oblouky.

### *Postup montáže*

1. Spojení hlavních nosníků s příčnicí a ztužidly v mostovce.
2. Připojení podélníků, položení hydroizolace.
3. Připojení oblouků na obou stranách, zajištění čepem, montážní podpěry oblouků.
4. Smontování obloukových příčnic a ztužidel.
5. Natažení a ukotvení závěsů.
6. Oplechování oblouku a hlavních nosníků.
7. Položení hydroizolace na podélníky a následně položení mostin.
8. Přesun lávky pomocí jeřábu na připravené betonové podpěry. Lávka se otočí o 90° do pozice kolmo na řeku Olši.
9. Zakotvení lávky do čepových ložisek.
10. Montáž zábradlí a dalšího vybavení lávky.

## 9. ZÁVĚR

V rámci diplomové práce byly navrženy a posouzeny všechny nosné prvky, ztužidla a vybrané spoje konstrukční varianty dřevěné lávky. Jedná se o obloukovou dřevěnou lávku pro pěší a cyklisty s šikmými ocelovými závěsy. Jako materiál nosné konstrukce lávky bylo použito lepené lamelové dřevo, rostlé dřevo pro mostiny a táhla z nerezové oceli pro závěsy. Pro spoje prvků byly využity zejména kombinace vložených ocelových plechů se svorníky nebo samovrtnými kolíky. Varianta obloukové lávky byla zvolena z důvodu nejvyšší tuhosti a splnění kritérií pohody chodců při kmitání konstrukce.

Obloukové konstrukce samy o sobě vynikají svým estetickým vzhledem, navíc spojení s lepeným lamelovým dřevem, jako dominantním materiálem, dodává lávce ekologický charakter. Budování velkého množství cyklostezek v karvinském regionu bylo impulsem k umístění lávky přes řeku Olši v Karviné - Starém Městě. Zde by konstrukce mohla propojit stávající stezku z Dětmovic do Českého Těšína s Orlovou. Poloha lávky však v zadání není upřesněna, proto by mohla navržená konstrukce najít uplatnění i v jiných oblastech s podobnými klimatickými podmínkami. Navržené rozpětí 30 m je dostatečné pro překonání menších vodních toků, místních komunikací či železničních tratí.

### Poděkování

Rád bych poděkoval doc. Ing. Antonínu Lokajovi, Ph.D. za trpělivost a odborné rady, které mi uděloval při konzultacích a bez kterých by tato práce nemohla vzniknout. Poděkování patří rovněž mé rodině za podporu v celé době studia. V neposlední řadě dlužím poděkování všem spolužákům ze studijní skupiny konstrukce staveb, kteří vytvořením silného konkurenčního, ale i přátelského prostředí, byli mým hnacím motorem v překonávání studijních překážek.

## 10. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Bubnový most v San Franciscu (Foto: W. Chou).....	- 3 -
Obrázek 2: Oblouky mostu Kintai a detail konstrukce [17].....	- 4 -
Obrázek 3: Matematický most v Cambridge [18] .....	- 5 -
Obrázek 4: Krytý most v Cogan House [19].....	- 6 -
Obrázek 5: Lávka v GOLF RESORT v Praze (Foto: TESKO Praha) .....	- 7 -
Obrázek 6: Lávka v Karlových Varech (Foto: TESKO Praha).....	- 8 -
Obrázek 7: Lávka v Českých Budějovicích (Foto: TESKO Praha) .....	- 8 -
Obrázek 8: Lávka přes Úpu (Foto: TAROS NOVA).....	- 9 -
Obrázek 9: Leonardův most, Norsko [20].....	- 10 -
Obrázek 10: Lávka v Dolním Němčí (Foto: CB s.r.o.) .....	- 11 -
Obrázek 11: Lávka ve Slavkově u Brna (Foto: CB s.r.o.) .....	- 11 -
Obrázek 12: Lávka v Souticích (Foto: CB s.r.o.).....	- 11 -
Obrázek 13: Lávka v Lardal, Norsko (Foto: A. Rönquist).....	- 12 -
Obrázek 14: Lávka v Essingu, Německo [21].....	- 13 -
Obrázek 15: Lávka Rádlo u Jablonce nad Nisou (Foto: TESKO Praha) .....	- 13 -
Obrázek 16: Model varianty Oblouk.....	- 15 -
Obrázek 17: Tabulka s hodnotami pevností pro táhla Macalloy [16] .....	- 22 -
Obrázek 18: Model varianty Věšadlo.....	- 23 -
Obrázek 19: Model varianty Příhrada .....	- 30 -
Obrázek 20: Průhyb horního pásu .....	- 33 -
Obrázek 21: Průhyb věšadla.....	- 34 -
Obrázek 22: Průhyb oblouku.....	- 34 -
Obrázek 23: Umístění lávky [22] .....	- 35 -
Obrázek 24: Pojmenování řešených prvků.....	- 36 -
Obrázek 25: LC2 - stálé .....	- 43 -
Obrázek 26: LC3 - chodci na celém mostě .....	- 43 -
Obrázek 27: LC4 - chodci na 1/2 příčně .....	- 43 -
Obrázek 28: LC5 - chodci na 5/8 podélně.....	- 44 -
Obrázek 29: LC6 - sníh na celém mostě .....	- 44 -
Obrázek 30: LC7 - sníh na 5/8 podélně.....	- 44 -
Obrázek 31: LC8 - vítr z boku .....	- 45 -

Obrázek 32: LC9 - vítr svisle dolů .....	- 45 -
Obrázek 33: LC11 - Teplota protažení.....	- 45 -
Obrázek 34: Výpočtový model .....	- 46 -
Obrázek 35: Statické schéma mostin s nejnepříznivějším zatížením.....	- 47 -
Obrázek 36: Porovnání vodorovných deformací (vlevo dřevěné hranoly, vpravo táhla) ...	- 65 -
Obrázek 37: Statické schéma podélníku zatíženého chodci.....	- 68 -
Obrázek 38: Celkový okamžitý průhyb podélníku .....	- 70 -
Obrázek 39: Označení posuzovaných spojů.....	- 71 -
Obrázek 40: Schéma čepového spoje.....	- 72 -
Obrázek 41: Schéma spoje oblouku s hlavním nosníkem a pevným čepem.....	- 81 -
Obrázek 42: Označení táhla s $N_{\max}$ .....	- 92 -
Obrázek 43: Schéma přípoje táhla k oblouku .....	- 92 -
Obrázek 44: Schéma spoje příčnicku a hlavního nosníku .....	- 96 -
Obrázek 45: Schéma montážního spoje hlavního nosníku.....	- 100 -
Obrázek 46: Schéma montážního spoje oblouku .....	- 104 -
Obrázek 47: Výstup ze Scia Engineer.....	- 108 -
Obrázek 48: Vlastní tvar vodorovného kmitání $f = 2,95 \text{ Hz}$ .....	- 108 -
Obrázek 49: Vlastní tvar kroutivého kmitání $f = 9,90 \text{ Hz}$ .....	- 109 -
Obrázek 50: Vlastní tvar svislého kmitání $f = 11,93 \text{ Hz}$ .....	- 109 -
Obrázek 51: Mostiny - $V_z$ .....	- 119 -
Obrázek 52: Mostiny - $M_y$ .....	- 119 -
Obrázek 53: Mostiny – svislý průhyb .....	- 120 -
Obrázek 54: Oblouk – $N$ .....	- 120 -
Obrázek 55: Oblouk - $V_y$ .....	- 120 -
Obrázek 56: Oblouk - $V_z$ .....	- 121 -
Obrázek 57: Oblouk - $M_y$ .....	- 121 -
Obrázek 58: Oblouk - $M_z$ .....	- 121 -
Obrázek 59: Oblouk - svislý průhyb .....	- 122 -
Obrázek 60: Oblouk - vodorovný průhyb .....	- 122 -
Obrázek 61: Hlavní nosník - $N$ .....	- 122 -
Obrázek 62: Hlavní nosník - $V_y$ .....	- 123 -
Obrázek 63: Hlavní nosník - $V_z$ .....	- 123 -
Obrázek 64: Hlavní nosník - $M_y$ .....	- 123 -
Obrázek 65: Hlavní nosník - $M_z$ .....	- 124 -

Obrázek 66: Hlavní nosník - svislý průhyb.....	- 124 -
Obrázek 67: Závěsy – N.....	- 124 -
Obrázek 68: Příčník (mostovka) - N .....	- 125 -
Obrázek 69: Příčník (mostovka) - $V_z$ .....	- 125 -
Obrázek 70: Příčník (mostovka) - $M_y$ .....	- 126 -
Obrázek 71: Příčník (mostovka) - svislý průhyb .....	- 126 -
Obrázek 72: Příčník (oblouk) – N .....	- 127 -
Obrázek 73: Ztužidlo (oblouk) – N .....	- 127 -
Obrázek 74: Ztužidlo Macalloy – N.....	- 128 -
Obrázek 75: Ztužidlo dřevěný hranol – N.....	- 128 -
Obrázek 76: Podélník - $V_z$ .....	- 129 -
Obrázek 77: Podélník - $M_y$ .....	- 129 -
Obrázek 78: Podélník - svislý průhyb .....	- 130 -

## 11. SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Porovnání spotřeby materiálu .....	- 34 -
Tabulka 2: Charakteristické hodnoty pevnosti a tuhosti použitého dřeva [10],[11] .....	- 37 -
Tabulka 3: Výpočet ostatního stálého zatížení .....	- 38 -
Tabulka 4: Svislá složka zatížení od dopravy .....	- 38 -
Tabulka 5: Vodorovná složka zatížení od dopravy .....	- 38 -
Tabulka 6: Výpočet zatížení sněhem .....	- 39 -
Tabulka 7: Výpočet svislého větru .....	- 41 -
Tabulka 8: Extrémy vnitřních sil v oblouku .....	- 50 -
Tabulka 9: Extrémy vnitřních sil hlavního nosníku .....	- 55 -
Tabulka 10: Tabulka pevností táhel Macalloy [16] .....	- 57 -
Tabulka 11: Tabulka pevností táhel Macalloy [16] .....	- 65 -
Tabulka 12: Porovnání frekvencí .....	- 109 -

## 12. SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ

- [1] ČSN EN 1990 ZMĚNA A1. *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. Český normalizační institut, 2007.
- [2] ČSN EN 1991-1-1. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-1: Obecná zatížení – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [3] ČSN EN 1991-1-3. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-3: Obecná zatížení – Zatížení sněhem*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [4] ČSN EN 1991-1-4. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [5] ČSN EN 1991-1-5. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-5: Obecná zatížení – Zatížení teplotou*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [6] ČSN EN 1991-2. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 2: Zatížení mostů dopravou*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [7] ČSN EN 1993-1-8. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-8: Navrhování styčníků*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [8] ČSN EN 1995-1-1. *Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla – Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [9] ČSN EN 1995-2. *Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 2: Mosty*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [10] ČSN EN 338. *Konstrukční dřevo – Třídy pevnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2010.
- [11] ČSN EN 1194. *Dřevěné konstrukce - Lepené lamelové dřevo – Třídy pevnosti a stanovení charakteristických hodnot*. Praha: Český normalizační institut, 1999.

- [12] ČSN 73 6110. *Projektování místních komunikací*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [13] ČSN 73 6201. *Projektování mostních objektů*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [14] <http://www.scia-online.cz/>
- [15] <http://www.snehovamapa.cz/>
- [16] <http://www.tension.cz/produkty/tahla-macalloy>
- [17] [https://en.wikipedia.org/wiki/Kintai\\_Bridge](https://en.wikipedia.org/wiki/Kintai_Bridge)
- [18] <http://www.worldarchitecturemap.org/buildings/mathematical-bridge>
- [19] <http://www.redbubble.com/people/profaudio/works/3780166-the-cogan-house-buckhead-covered-bridge-revisited>
- [20] <http://freshttraveldestinations.com/leonardo-bridge-golden-horn-norway/>
- [21] <https://www.pinterest.com/pin/146578162844082850/>
- [22] <http://mapy.cz/zakladni?x=18.5056894&y=49.8535638&z=16>
- [23] DOSTÁLOVÁ, D. *Diplomová práce – Jihoamerické civilizace (zejména incká) z antropologické perspektivy*. Brno, 2006.
- [24] PENBERTHY, I. *MOSTY 75 nejimpozantnějších mostů, lávek a viaduktů světa*. Brno: Computer Press, a. s., 2009.
- [25] Příručka 1 a 2, <http://fast10.vsb.cz/temtis/cz>, 2008.

**Seznam použitého softwaru:**

Microsoft Office 2010

Scia Engineer 14

AutoCAD Architecture 2014

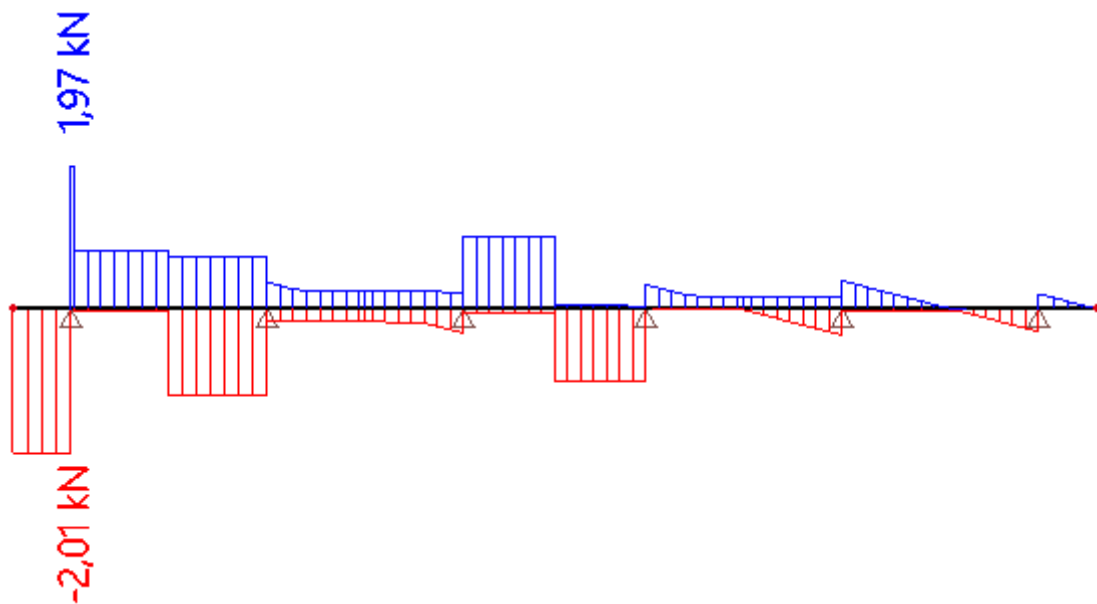


## 13. SEZNAM PŘÍLOH

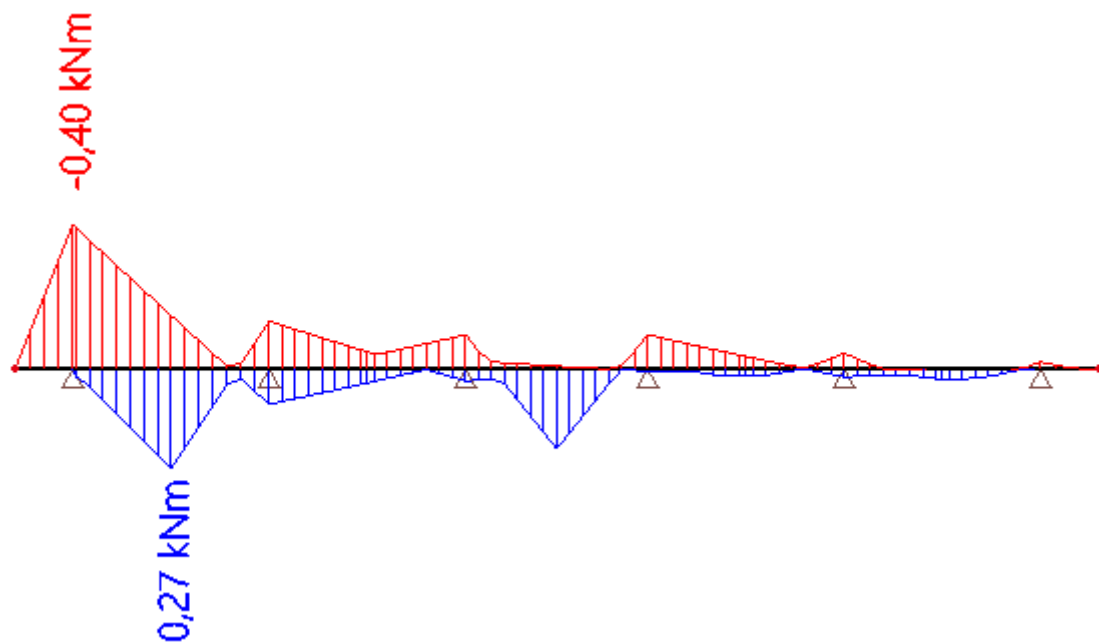
- 1 Mostiny – obalové křivky vnitřních sil a deformací
- 2 Oblouk – obalové křivky vnitřních sil a deformací
- 3 Hlavní nosník – obalové křivky vnitřních sil a deformací
- 4 Závěsy – vnitřní síly nejvíce namáhaného táhla
- 5 Příčník (mostovka) – obalové křivky vnitřních sil a deformací
- 6 Příčník (oblouk) – obalové křivky vnitřních sil
- 7 Ztužidlo (oblouk) – obalové křivky vnitřních sil
- 8 Ztužidlo Macalloy (mostovka) – obalové křivky vnitřních sil  
Ztužidlo dřevěný hranol (mostovka) – obalové křivky vnitřních sil
- 9 Podélník – obalové křivky vnitřních sil a deformací
- 10 Výkresová dokumentace:
  - 1 – Podélný řez a pohled
  - 2 – Půdorys
  - 3 – Příčný řez a pohled
  - 4 – Detaily 1, 3, 4
  - 5 – Detail 2
  - 6 – Detaily 5, 6, 7

## 14. PŘÍLOHY

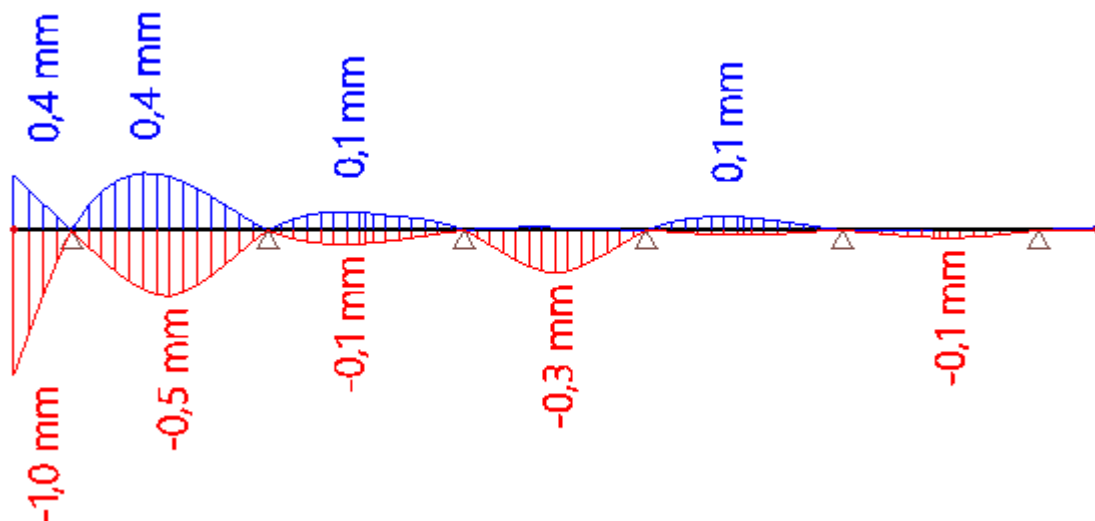
### 1 Mostiny – obalové křivky vnitřních sil a deformací



Obrázek 51: Mostiny -  $V_z$

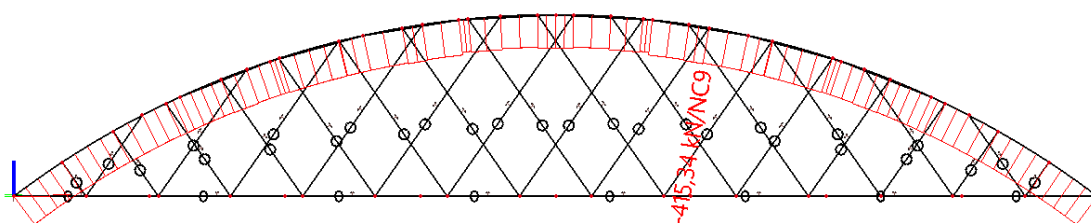


Obrázek 52: Mostiny -  $M_y$

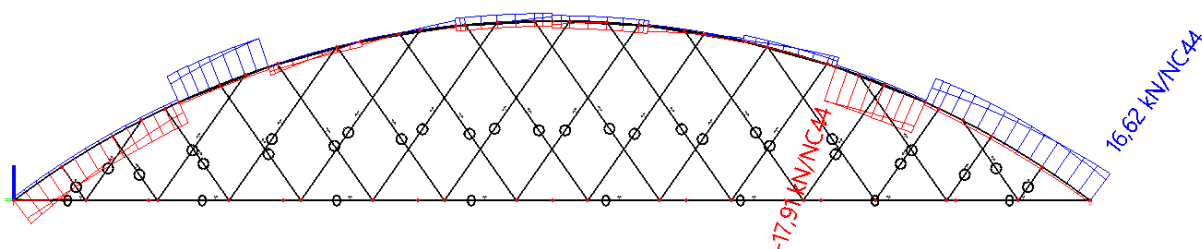


Obrázek 53: Mostiny – svislý průhyb

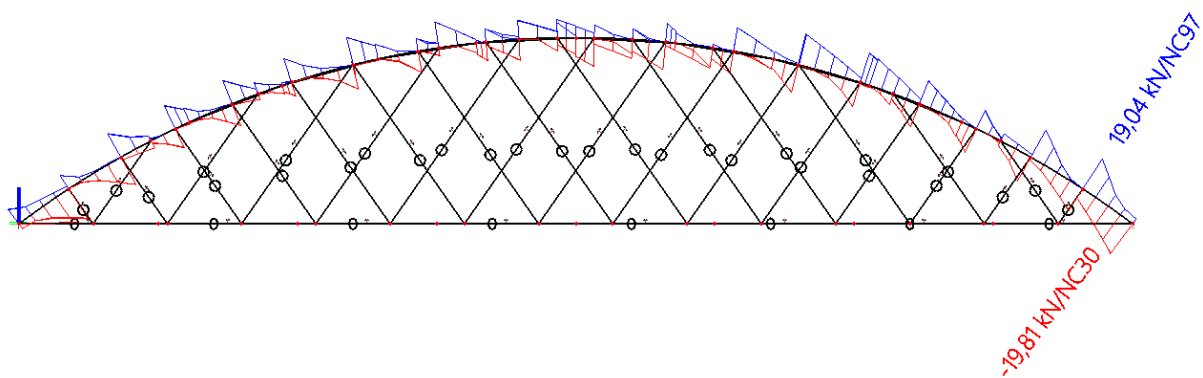
## 2 Oblouk – obalové křivky vnitřních sil a deformací



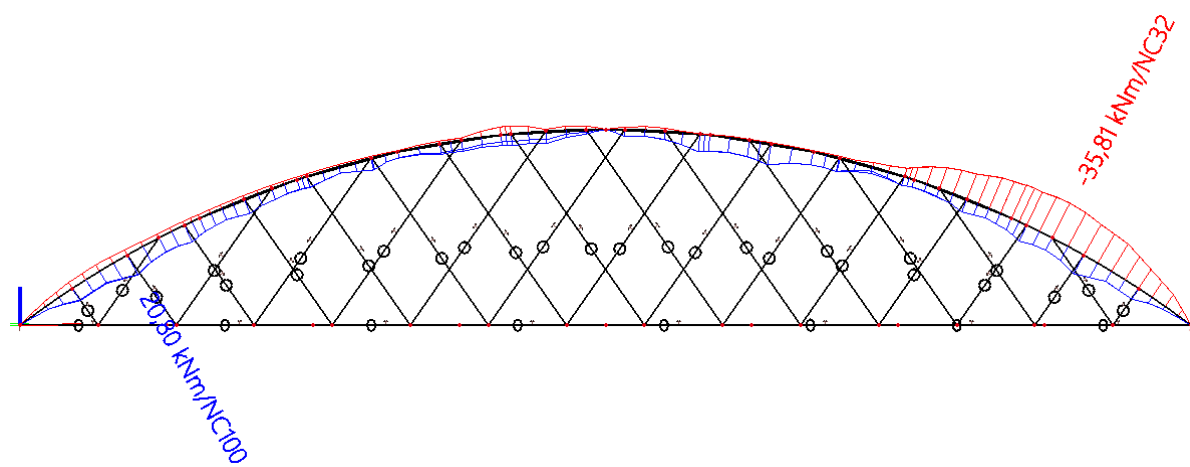
Obrázek 54: Oblouk – N



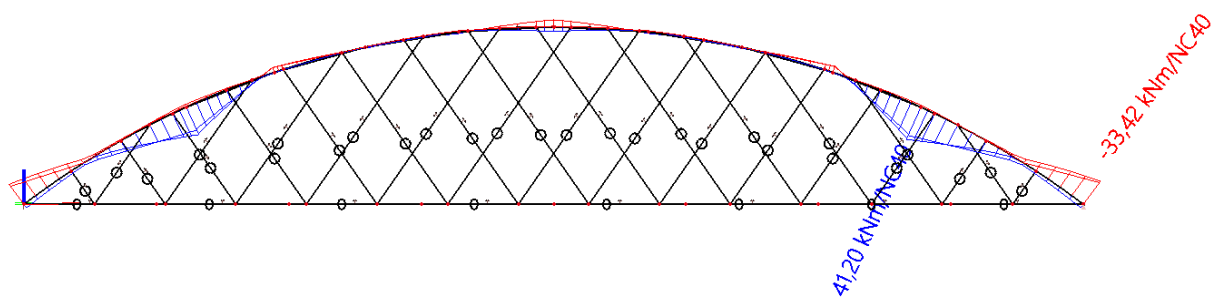
Obrázek 55: Oblouk -  $V_y$



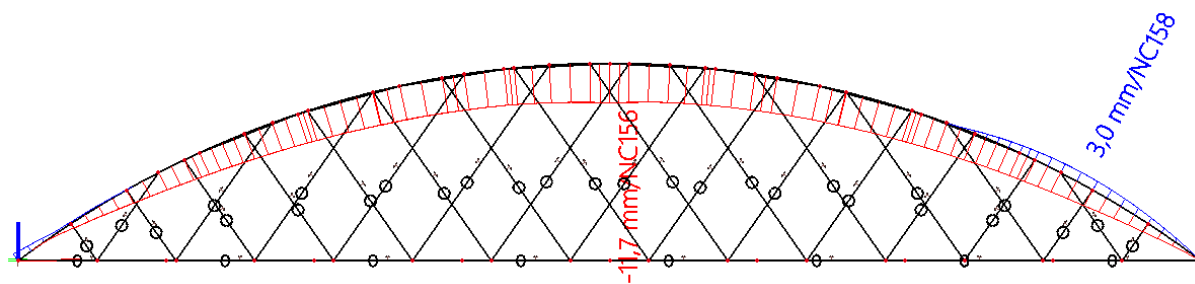
Obrázek 56: Oblouk -  $V_z$



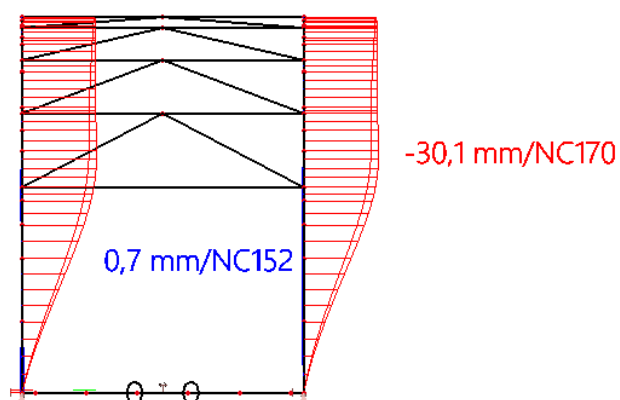
Obrázek 57: Oblouk -  $M_y$



Obrázek 58: Oblouk -  $M_z$

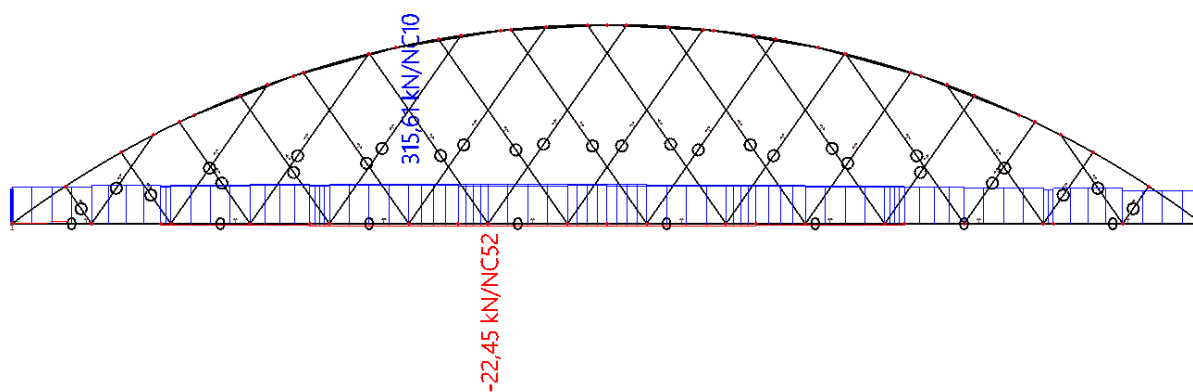


Obrázek 59: Oblouk - svislý průhyb

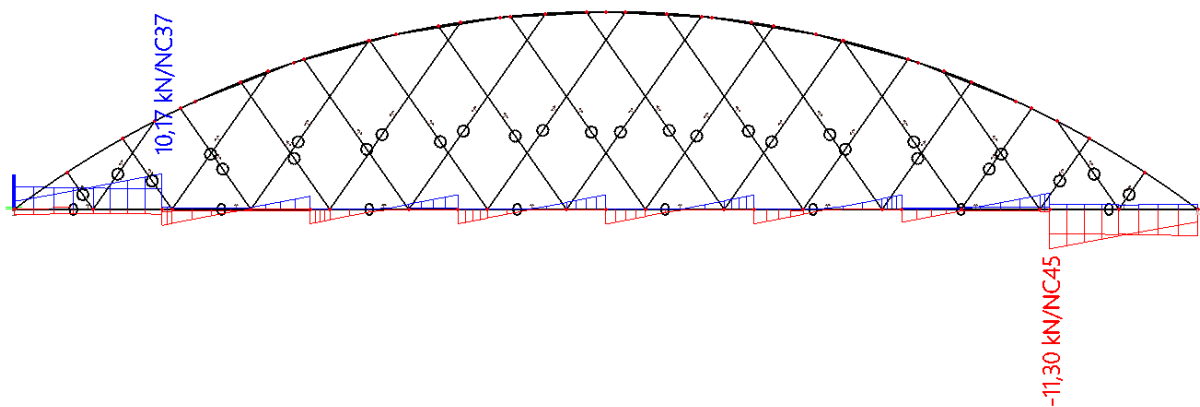


Obrázek 60: Oblouk - vodorovný průhyb

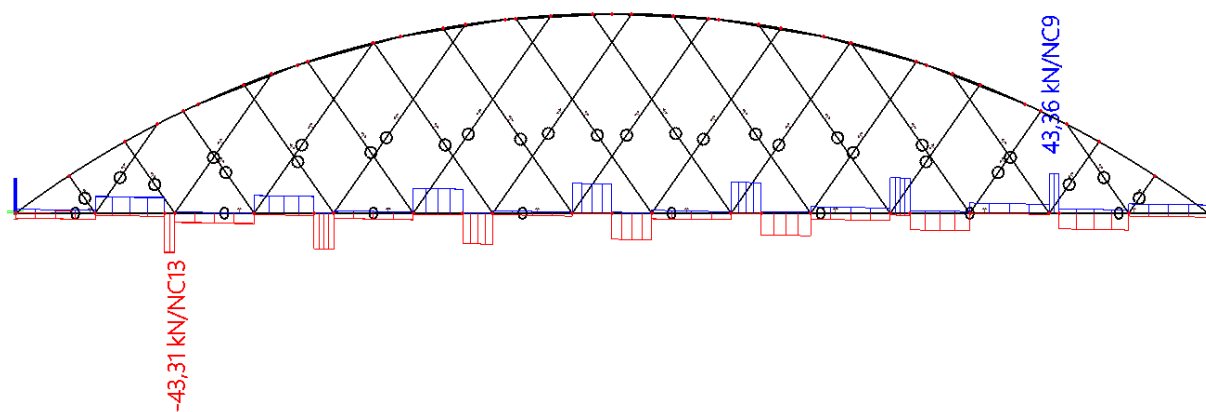
### 3 Hlavní nosník – obalové křivky vnitřních sil a deformací



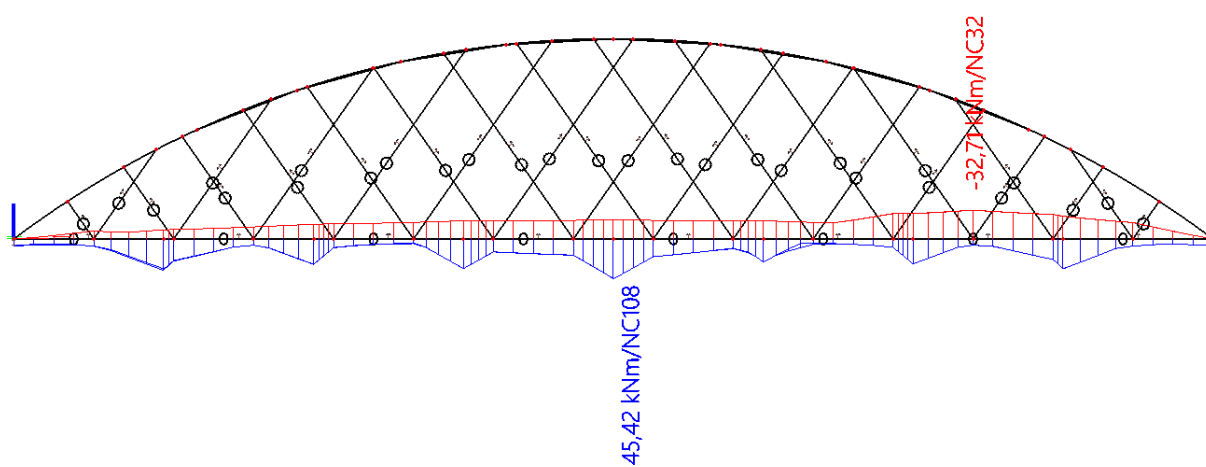
Obrázek 61: Hlavní nosník - N



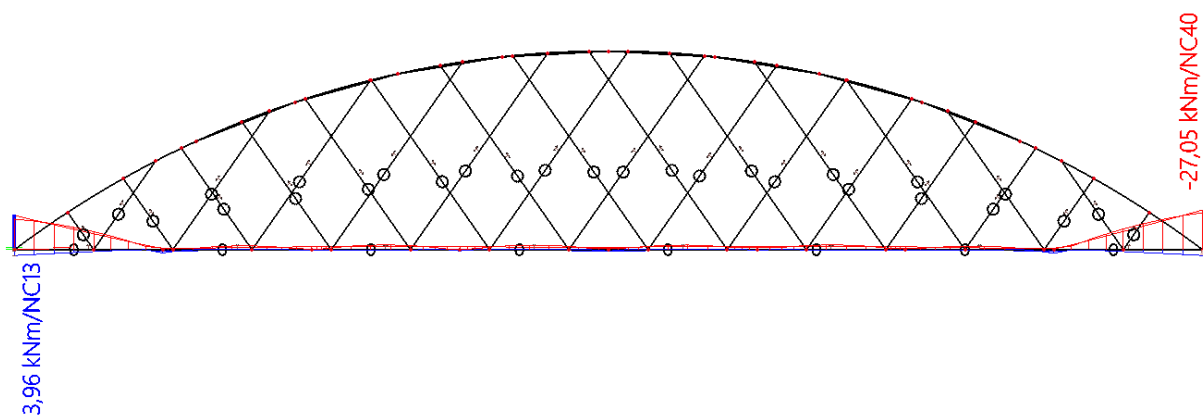
Obrázek 62: Hlavní nosník -  $V_y$



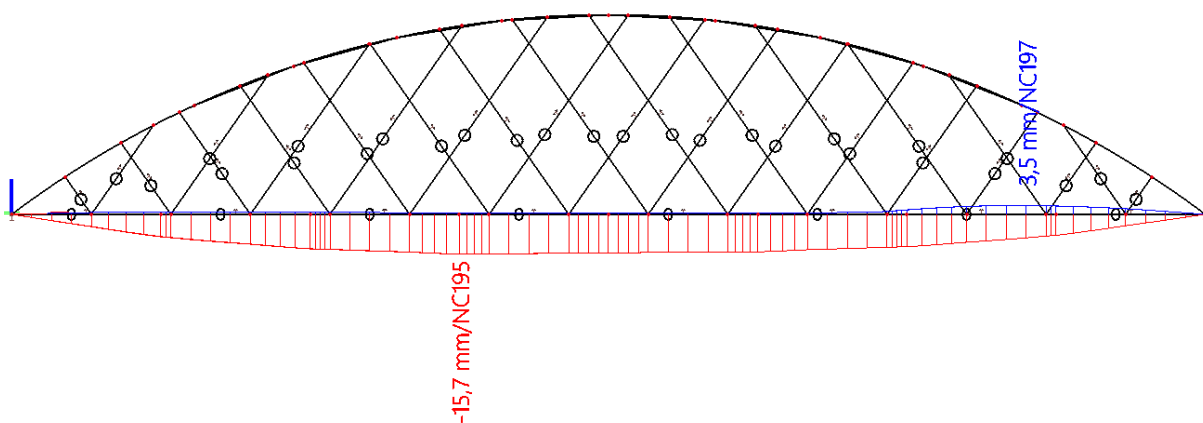
Obrázek 63: Hlavní nosník -  $V_z$



Obrázek 64: Hlavní nosník -  $M_y$

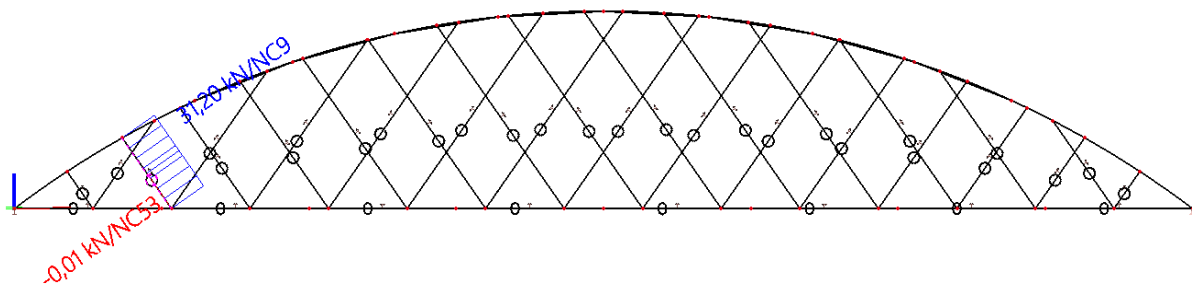


Obrázek 65: Hlavní nosník -  $M_z$



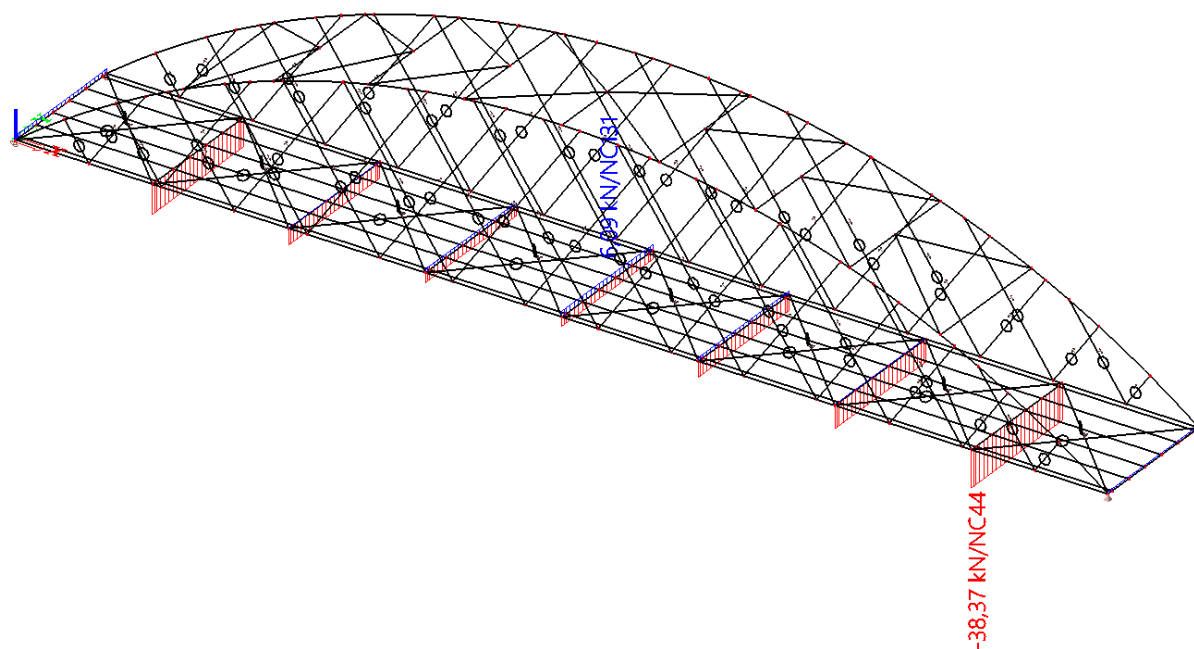
Obrázek 66: Hlavní nosník - svislý průhyb

#### 4 Závěsy – nejvíce namáhané táhlo

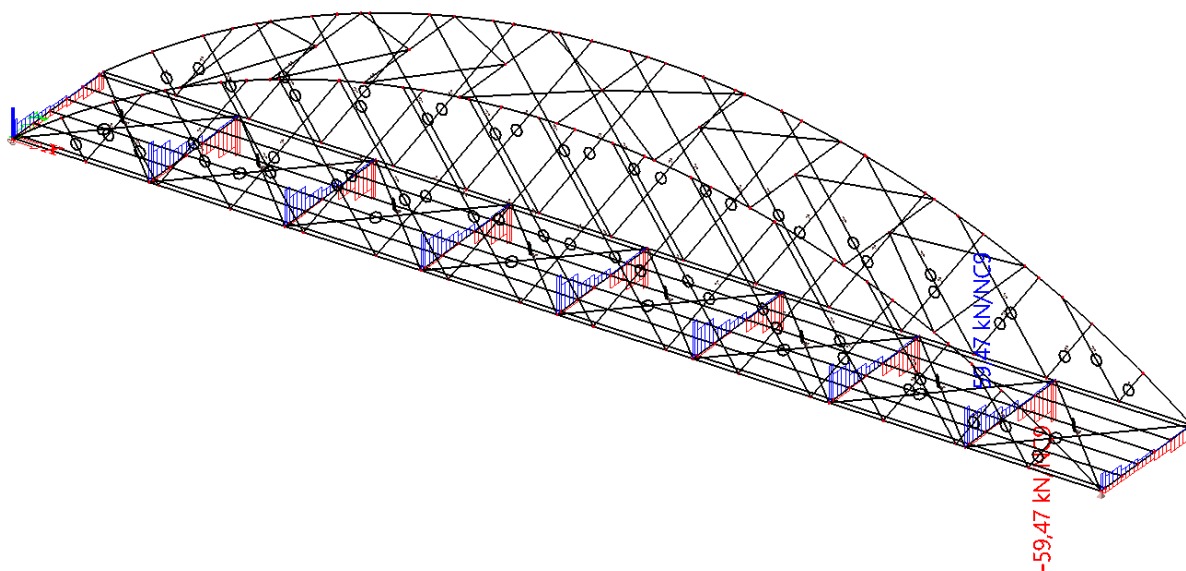


Obrázek 67: Závěsy – N

## 5 Příčník (mostovka) – obalové křivky vnitřních sil a deformací

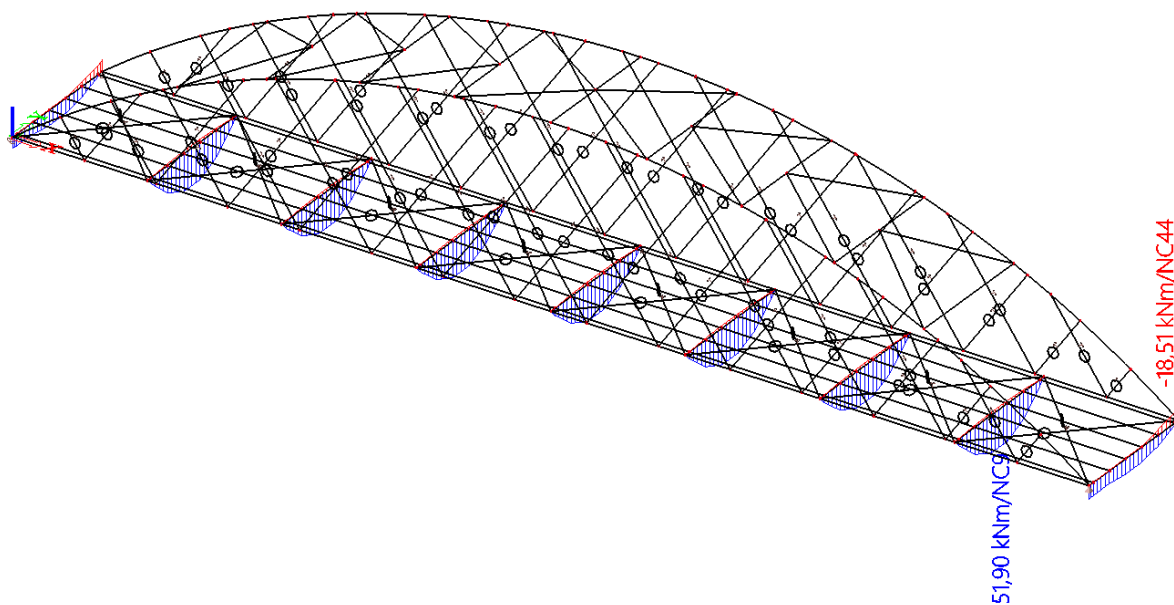


Obrázek 68: Příčník (mostovka) - N

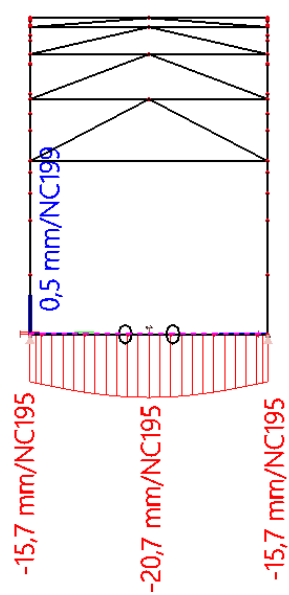


Obrázek 69: Příčník (mostovka) -  $V_z$



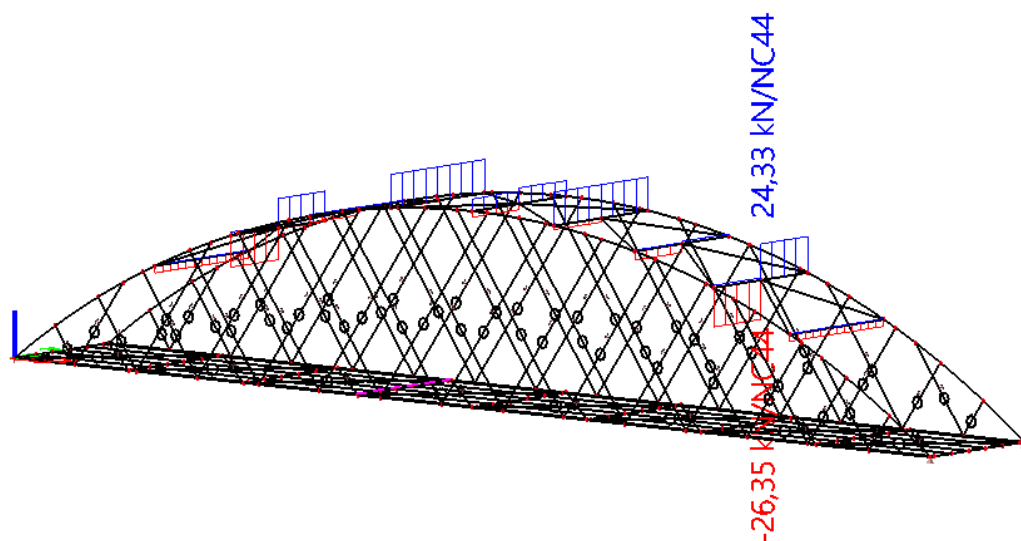


Obrázek 70: Příčník (mostovka) -  $M_y$



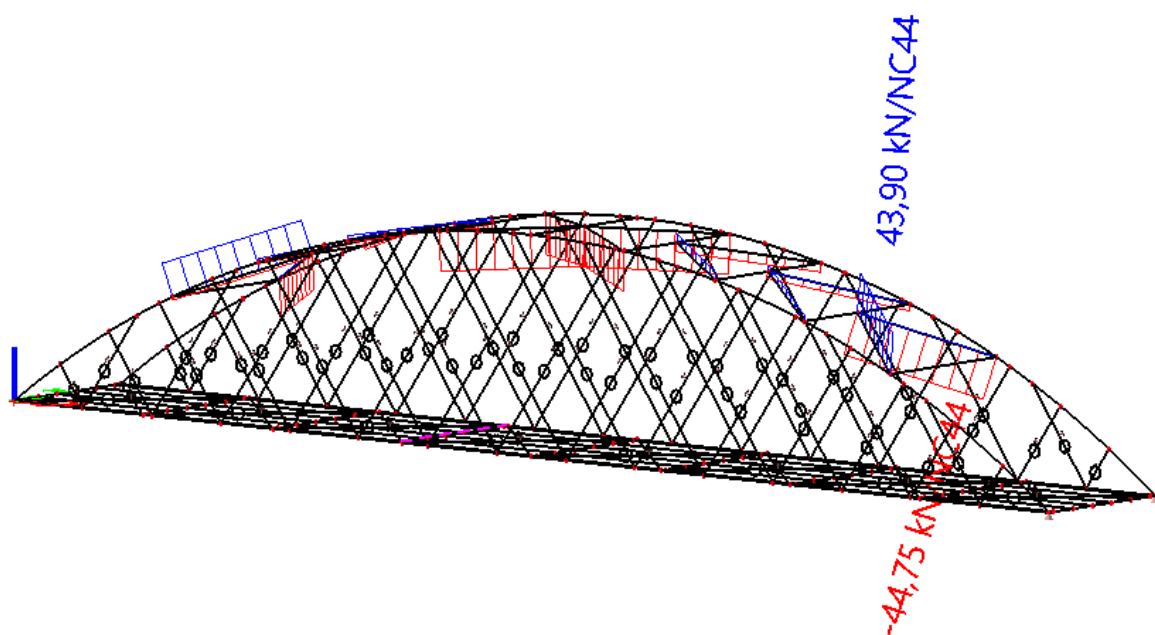
Obrázek 71: Příčník (mostovka) - svislý průhyb

## 6 Příčník (oblouk) – obalové křivky vnitřních sil



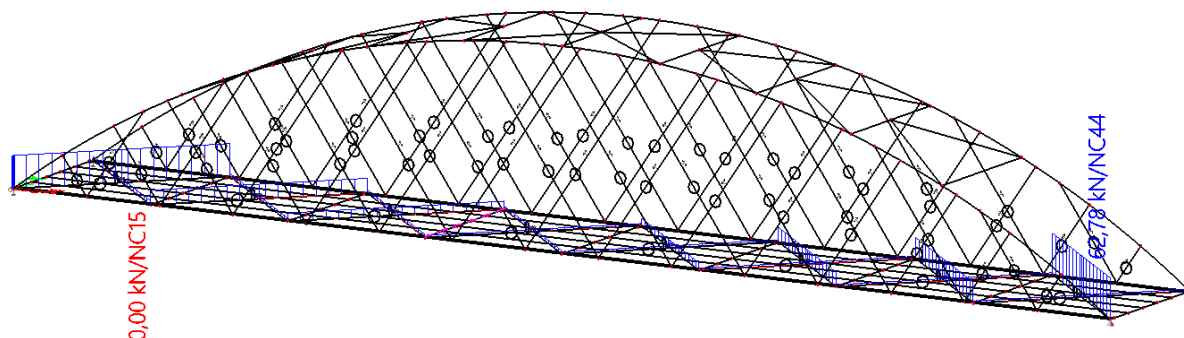
Obrázek 72: Příčník (oblouk) – N

## 7 Ztužidlo (oblouk) – obalové křivky vnitřních sil



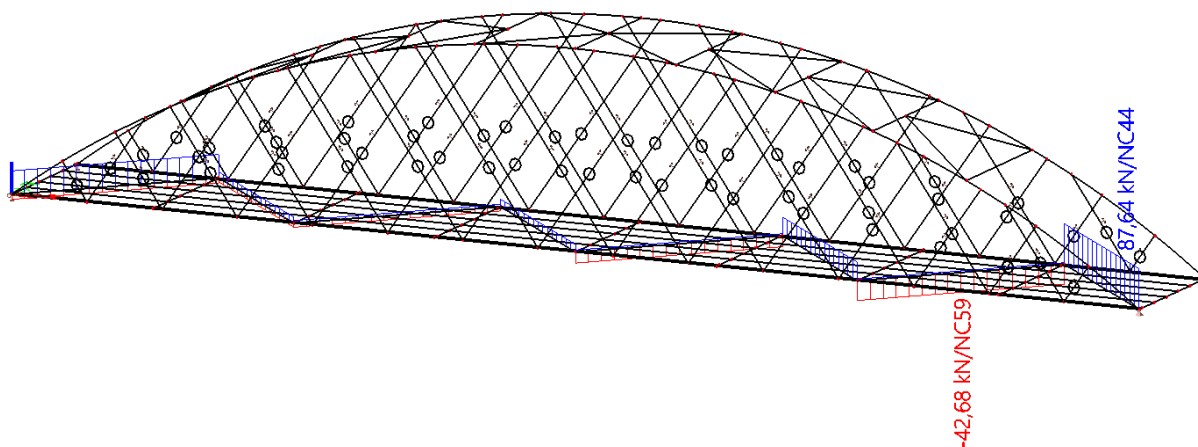
Obrázek 73: Ztužidlo (oblouk) – N

### 8.1 Ztužidlo Macalloy (mostovka) – obalové křivky vnitřních sil



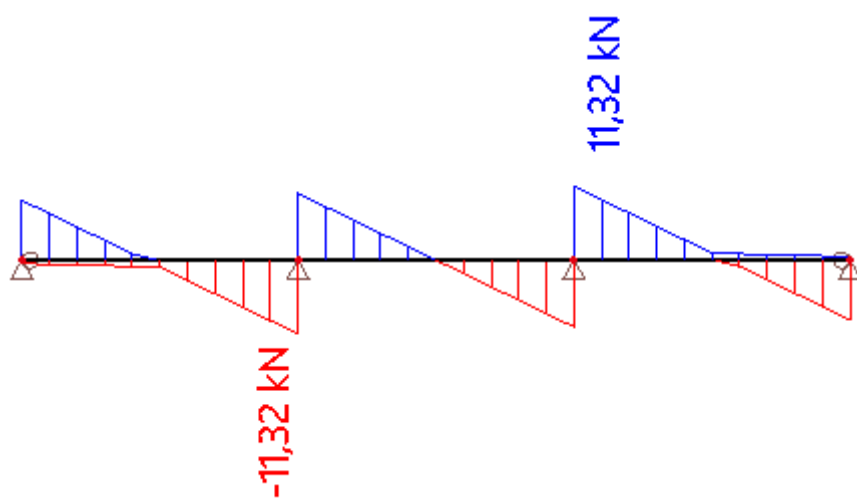
Obrázek 74: Ztužidlo Macalloy – N

### 8.2 Ztužidlo dřevěný hranol (mostovka) – obalové křivky vnitřních sil

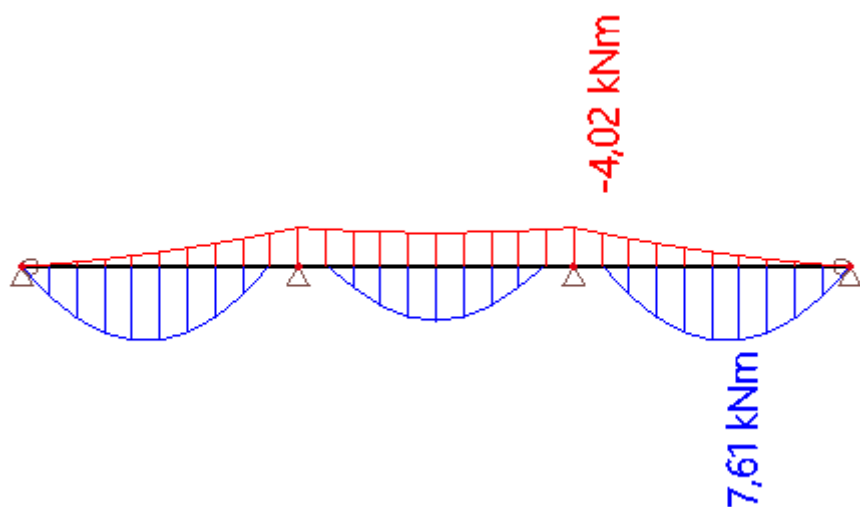


Obrázek 75: Ztužidlo dřevěný hranol – N

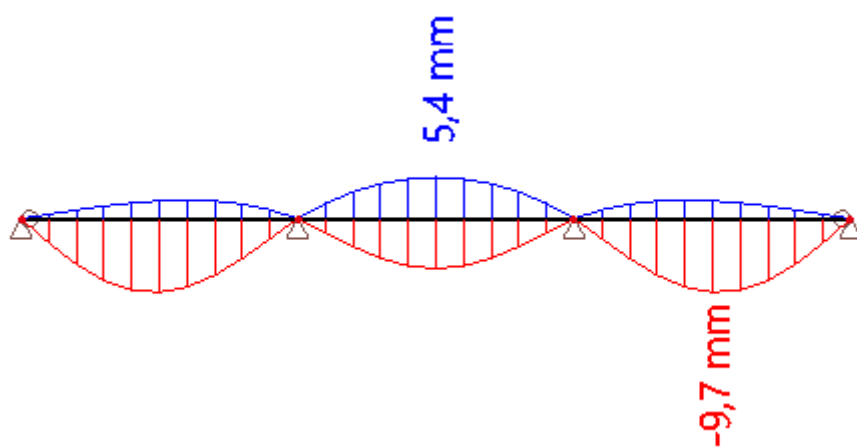
## 9 Podélník – obalové křivky vnitřních sil a deformací



Obrázek 76: Podélník -  $V_z$



Obrázek 77: Podélník -  $M_y$



Obrázek 78: Podélník - svislý průhyb